小型水力発電機の設計開発

Design and development of small-sized waterpower generator

高知工科大学大学院

環境機械･材料強度研究室

学籍番号：1115047

竹村　義也

第 1 章　緒言 3
第 2 章　水車の設計製作 5
2-1　水力エネルギーの試算 5
2-2 水車の選定 6
2-3　設置場所の選定 7
2-4　水車の設計製作 10
2-5　水車の浸水実験 11
第 3 章　発電機の基本と動磁場解析 13
3-1 発電原理 13
3-2　発電機の構造 13
3-3　コギングトルク 15
3-4　コアレス発電機 16
3-5　発電機の動磁場解析 16
3-5　発電機の動磁場解析 17
3-6　解析モデル 19
3-7　鎖交磁束からの誘起電圧の計算 21
第 4 章　コアの厚みが及ぼす発電性能への影響 22
4-1　コアの厚み 22
4-2　解析モデル 22
4-3　解析結果 23
4-4　動磁場解析の有効性（実験結果と数値解析値との比較） 25
4-5　実験 25
4-6　比較結果 26
4-7　発電機の負荷実験 27
4-8　磁束密度の可視化 29
第 5 章　二層型発電機 36
5-1　コイルのずれによる発電効率への影響 36
5-2　磁石をずらした場合の発電効率への影響 40
第 6 章　結言 42
謝辞 44

第１章　緒言

近年、エネルギー資源の枯渇問題が世界的に大きな問題になっている。特に、火力発電や自動車燃料などに必要な石油については現在の速度での可採を続けると 40 年も持たないとされている（図 1-1 参照）。また、この表の数値は近年の中国、インドなどの発展途上国の急速な経済発展によりさらに短くなる可能性もある。

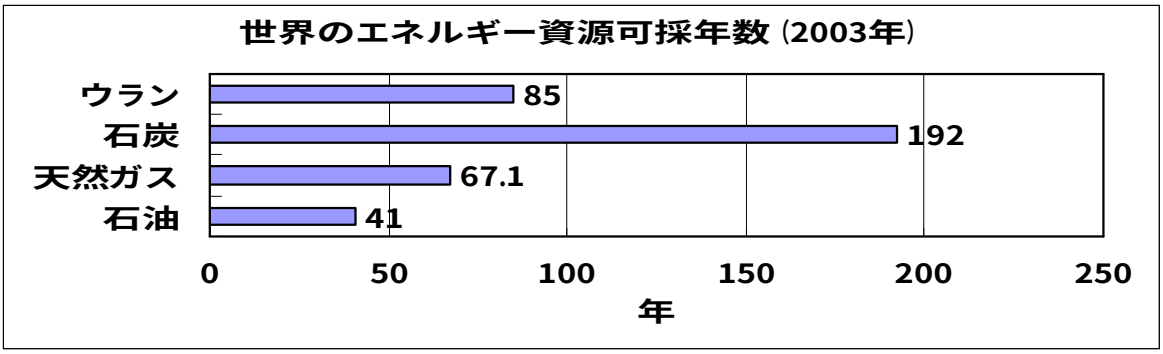


図 1-1 世界のエネルギー資源の可採年数

そこで、エネルギー問題を考慮に入れ自然エネルギーの利用した発電を行いたいと考えた。特に本研究では水力発電に注目した。水力発電は水の持っているエネルギーを使い発電を行う。その為、二酸化炭素などの温室効果ガスなどを出すことない適正な自然エネルギーであるといえる。水力発電は他の自然エネルギー発電に比べて安定した電力供給ができる事や、発電量が高い事などメリットは高い。しかし、日本の水力発電の使用量は図 1-2 のように維持またはやや減少してきている。これは、水力発電の主なものはダムなどが必要な大規模なものであり、設置場所の選定が難しいことや設置工事が大規模になり河川の水質や生態系への問題点もある為、導入しにくいためであると考えられる。しかし、日本には小川や農業用水路なども含めれば豊富な水資源のある国である。このような小さな水源を利用した小規模な発電であれば生態系や水質に影響なく、環境にやさしいエネルギーを作ることができると考え

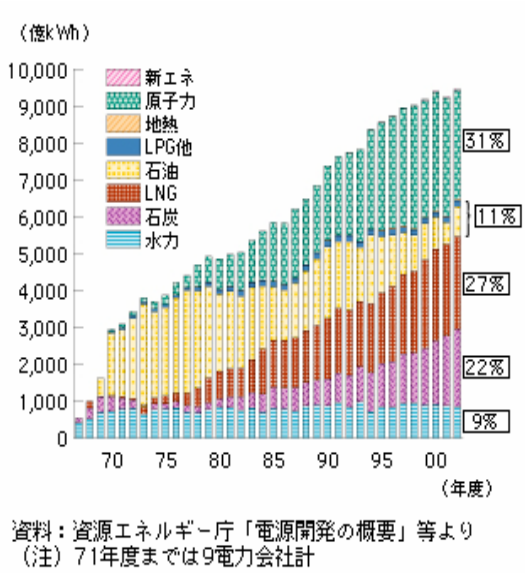


図 1-2　日本のエネルギー推移
(出典：資源エネルギー庁ホームページ)

られる。現在、小型水力（マイクロ水力）発電は個人や、地方自治体などでも小規模にしか行われていないのが現状である。また、小さな動力での発電に適した小型水力（マイクロ水力）発電に適した発電機の開発はあまり進んでいない。そこで、本研究では農業用水路への設置を目的に農業用水路に適した水車の設計・製作また、その水車に設置する小型水力発電に適した小型発電機の設計を動磁場解析を用いて行い、検討、試作、実験を行った。

第２章　水車の設計製作

2-1　水力エネルギーの試算

水力発電は第１章でも述べたように、水の持っているエネルギーを利用して水車を回し、この水車を原動機として発電機を回転させて、水力エネルギーを電気として取り出す。よって、落差が高いほど、または、水量が多いほど大きな電気を取り出すことが可能である。

その関係式は以下のようになる。（図 2-1 参照）

理論水力　9.8H・Q（kW）・・・・・・・・・・・(2-1)

水車出力　9.8H・Q・η_T（kW）

発電力　　9.8H・Q・η_T・η_G（kW）

H：有効落差（m）

Q：使用水量（m^3/s）

η_T：水車の効率

η_G：発電機の効率

有効落差というのは水源から水車を設置した総落差から水車にいたるまでの摩擦やこう配による損失を引いたものである。水車の効率、発電機の効率についてはそれぞれを通った後のエネルギーを通る前のエネルギーで割ったものでそれぞれの機器に奪われた水力エネルギーによって決まる。１に近ければ効率がよく０に近いと効率が悪い設計となる。

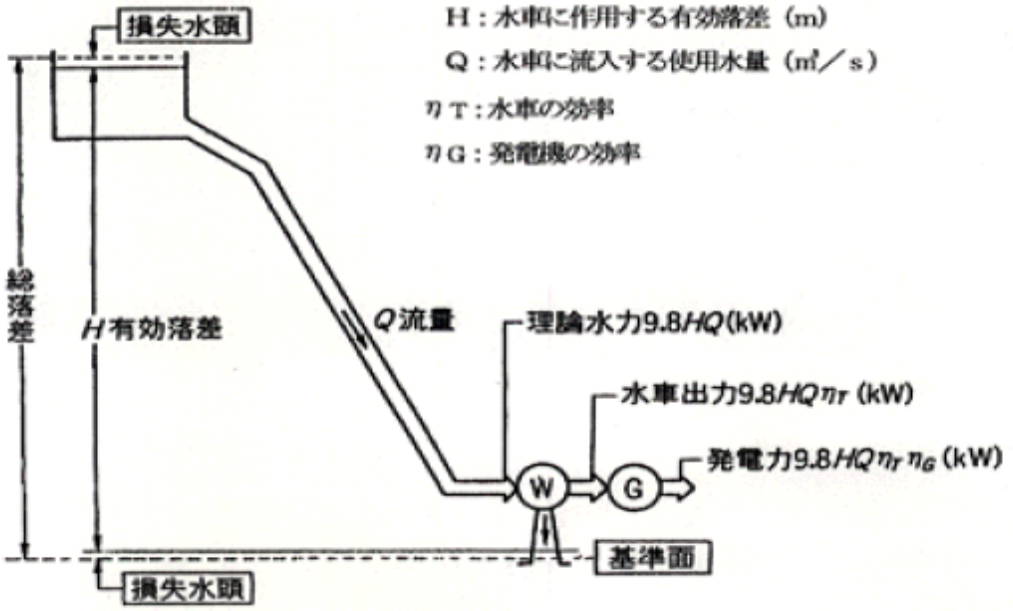


図 2−1　水力発電の計算法

2-2 水車の選定

水力発電の用の水車には図 2-2 のような分類がある。

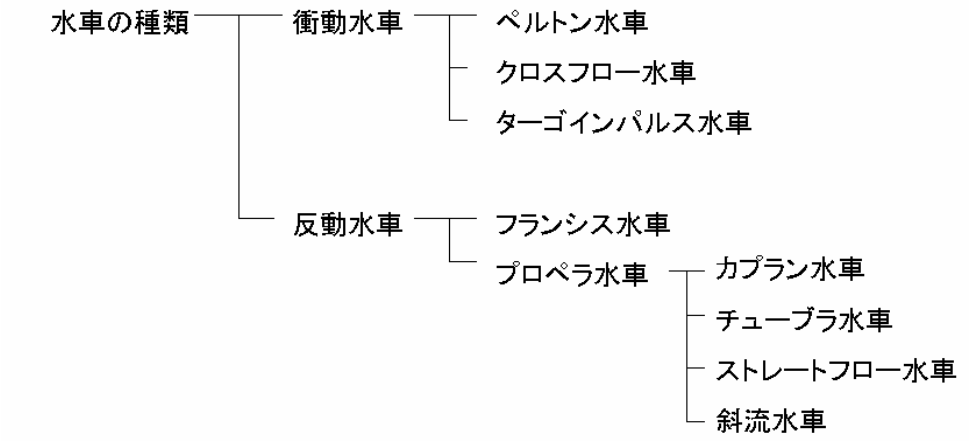


図 2－2　小型水力発電の種類

衝動水車というのはペルトン水車に代表されるような水の通り道をノズルによって圧縮しそこから出る圧力を持つ水を水車の速度に変え噴出する水の衝撃によって水車を回転させる方法である。反動水車は水圧を水車の回転エネルギーに変換するのは同じであるがフランシス水車のように回転軸と水面が垂直になっているという特徴がある。この両水車は特徴こそ違うが、発電を行う為には大きな有効落差が必要となってくる。そのため、大規模から中規模な工事が必要になってくる。そこで、今回の発電では日本人が水車といわれて最初に思い浮かべるような水車に代表されるような開放周流形水車を使用しようと考えた（図 2-3 参照)。開放周流形水車は表を見比べても分かるように有効落差や流量が低くても発電が容易にできる。しかし、この水車の回転数はおよそ 10～100（rpm）であり発電をする為には発電機にあった回転数の増幅が必要になる。

図 2－3　開放周流形水車の例

表 2－4　水車の使用例

水車種類	有効落差（m）	使用水量（m^3/s）
ペルトン水車	40～300	0.05～2
クロスフロー水車	2～60	0.05～4
フランシス水車	10～300	0.2～6
プロペラ水車	2～18	0.05～6
開放周流形水車	3～以下	0.1～10

2-3　設置場所の選定

本研究では水車の設置試験場所として農業用水路を設定する。理由は水路の整地が既にされており開放周流型水車の場合は簡単に設置することが出来る。そして、最大の理由としては農業用水路には一定間隔で急激な落差がある（図 2-5 参照）。これは、流速を安定させる為など、いろいろな理由があるがかなりの損失落差があることは事実である。そこで、落差の変わりに水車の設置を行えば流速などの調整が可能になり、そのうえ、発電を行うこともできエネルギー問題への対応にも応用できるのではないかと考える。

図 2−5　農業用水の落差

そこで、水車の設置場所に適していると考える農業用水路を調べその流速を調査した。調査に使用した測定器と測定場所、測定結果は以下の通りである。（図 2-6、表 2-1、図 2-7 参照）

図 2−6　流速測定場所

表 2－1 測定結果

場所	水路幅（ｃｍ）	水深（ｃｍ）	流速（m/ｓ）
A 地点	50	60	0.20
B 地点	130	16	0.20
C 地点	170	20	0.05
D地点	280	50	0.23
E地点	500	100	0.31

-使用した測定器-

（カウンター部）

KENEK 社　VR-101 型

測定範囲：3～200ｃｍ/ｓ

平均時間：1、5、10、20、40 秒の５点で
　　切り替えが可能

使用温度範囲：0～40℃

電源：単３電池４本

寸法：148（W）×68（H）×188（D）mm

重量：約 650ｇ

（検出器）

KENEK 社　VRT-200-20 型

測定範囲：3～200ｃｍ/ｓ

検出方式：磁石～ホール IC 方式

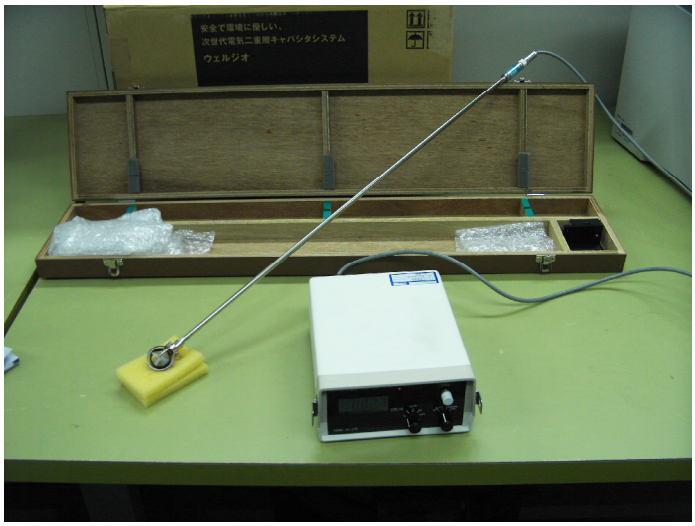


図 2－7　使用した測定値

測定誤差：±3ｃｍ/ｓ

プロペラ材質：φ20mm　４枚羽根　ポリプロピレン樹脂（8 パルス磁石リング付）

出力信号：0.3V（ｐ-ｐ）

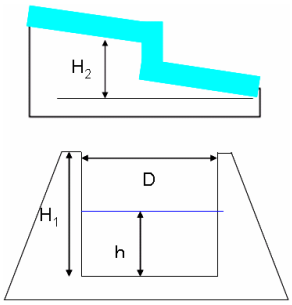
分解能：１回転 8 パルス（約 5.5ｃｍ/ｓ）

使用温度：5～55℃

重量：約 75ｇ

以上のような調査の結果や設置規模や水量から考慮した結果図のＦ地点で試験を行うことを決定した。Ｆ地点の詳しい情報は下図 2-9 の通りである。また、計測を行った時期は冬場の農業をやっていない時期で流量については１年で１番少ない時期である。そこで１年間の平均流量になると今回の結果よりも大きな値になると考えられる。

図 2-8　開放周流形水車の設置地



水深　ｈ＝470mm
水幅　D=1000mm
高さ　H1＝1200mm
落差　H2＝500mm
断面積 A＝ｈ×D＝0.47m²

図 2－9　水源の大きさ

表 2－2　流速の測定結果

m/ｓ	1 日目	2 日目
1	0.979	0.732
2	0.952	0.726
3	0.952	0.682
4	0.963	0.351
5	0.918	0.711
6	0.991	0.7
7	0.954	0.677
8	0.936	0.68
9	0.967	0.683
10	0.944	0.664
平均	0.9556	0.6606

平均流速 V=（0.96+0.66）/2＝0.81（m/ｓ）

以上の結果より流速Qは

$Q = V \times A = 0.81 \times 0.47 = 0.38$

2-1 式より

理論水量 $9.8 \times Q \times H = 9.8 \times 0.38 \times 0.5 = 1.86(kW)$

となる。（有効落差Hは発電機設置予定地の１つ上の落差からの高さで計算を行った。）

以上の計算より発電量のは最大値は理論水量 1.86（ｋW）であることが分かった。

2-4　水車の設計製作

水車の選定時には以下のことを考慮する。

・　能率がよい。
・　回転数をなるべく高くする。
・　価格が安価であること。
・　構造が簡単で取り扱いが容易であること。

以上のようなことを考え水車の設計に取り掛かった。今回は農業用水路を使用する為、水車を入れることで農業用水路の水位が急激に上がってしまうと農作業などに支障をきたす為都合が悪い。また、水車の固定は水車と発電機の自重で行わなくてはならない。そこで、今回は土台には安価で丈夫で重い市販のＬ字アングルを使用し、水車の羽の枚数を８枚にして水の当たる位置を図のように羽が一番下に来たときにすべてのエネルギーを受けられるようにする。羽には交換コストのことを考えてベニア板を使用する。以上を考慮に入れて３Ｄ－ＣＡＤソフトを使用し水車の設計を行い、それをもとに水車の自作を行った。（図 2-10～12 参照）

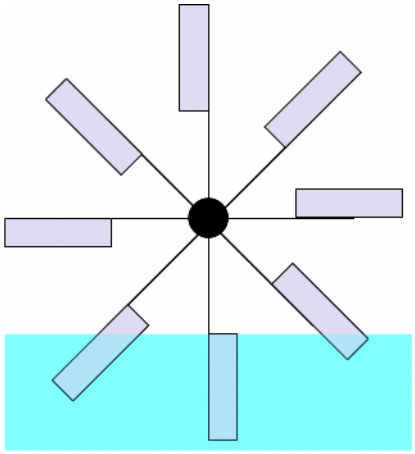


図 2-10　水車の沈め方

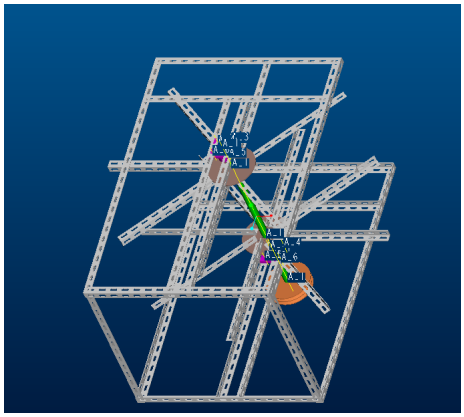


図 2-11　水車の CAD 図

図 2-12　水車の完成図

次に、発電機については本研究室で水力発電の研究で使用したアキシャルギャップ型コアレス発電機（図 2-13 参照）を使用する。コアレス発電機については次節で詳しい説明を行う。この発電機を使い発電を行う為には 300(rpm)から 600(rpm)の回転数が必要である。先の節でも述べたとおり開放周流形水車は回転数が多くても 100（rpm）前後なので増速を行う必要がある。そこで、発電機と水車の間にギアボックスが必要になるが災害時に故障などが起こると代替えが難しくなる。またこの発電方式を普及させようとするとギアボッ

クスは水路によってオーダーメイドになってしまうのでコスト面からも高くなってしまう。そこで代替えやコストのことを考慮に入れてギアボックスの変わりに市販の自転車を実験として使用する。（図 2-14 参照）増速のシステムは図 2-15 のようになりペダルにプーリを取り付けその動力を車輪から発電機に伝える。その増幅率は今回使用した自転車が変速機付きであるので３０倍から６０倍の増幅を行うことができる。そして、完成したギアボックスと発電機は以下のようになる。

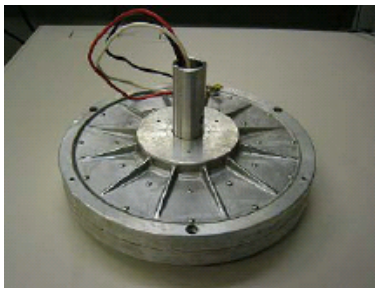


図 2-13　アキシアルギャップ型コアレス発電機

図 2-14　自転車のギアボックス

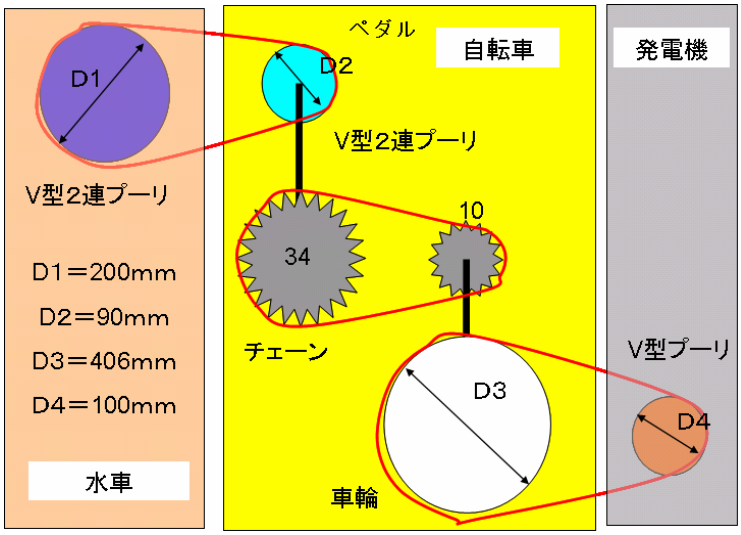


図 2-15　ギアボックス仕組み

2-5　水車の浸水実験

完成した小型水力発電機の浸水実験を行った。雨の心配があったため発電機の発電性能については後日改めて調査する。実験の結果は表 2-3 の通りである。

この結果のように水位の増加は 11%、流速の増加は 6%とほとんど変化が起こらなかった。この為、開放周流形水車の発電は農業用水などの低落差でも十分な発電が可能であるといえる。

表 2-3　浸水実験結果

流速	水車手前（ｃｍ/ｓ）	水車後（ｃｍ/ｓ）
1	85.1	79
2	86.7	80
3	86.2	81.7
4	86.4	85.7
5	85.6	83.3
6	89.7	79.2
7	87.8	81.3
8	85.4	81.9
9	89.4	86.2
10	89.7	78.7
平均	87.2	81.7

水車の回転速度：V=4.47（ｓ/回転）
水車回転数：60／V＝
60／4.47＝13.42（rpm）
発電機回転数：13.42×30 倍
13.42×30＝402.6（rpm）
水位変化
水車前：49（ｃｍ）
水車後：55（ｃｍ）
水位の増加率：11%

第 3 章　発電機の基本と動磁場解析

3-1 発電原理

磁界中で磁石とコイルの位置が近づいたり離れたりすると、磁界が変化して誘導電流が流れる。この原理を応用したのが発電機である。

磁束密度 B[T]の一様な磁場の中で導線(磁界内の長さ l [m])を、磁場と導線に垂直な向きに速度 v[m/s]で移動させると、導体に誘電起電力 e[V]が発生する。

$$e = vBl \qquad (1)$$

(1)式をコイルの関係に当てはめると、n 巻きのコイルを通る磁束が時間 dt[s]の間に $d\phi$ [Wb]だけ変化するときに生じる誘導起電力 e[V]は次式になる。

$$e = -n\frac{d\phi}{dt} \qquad (2)$$

(負の符号は、磁束の変化を打ち消す向きに誘導起電力が生じていることを示している)

以上の式から磁石を動かす速度が大きいほど、また磁石の磁場が強いほど、誘導起電力が大きくなることがわかる。

3-2　発電機の構造

発電機の構造は基本的に電動機と同じであり、発電機の構造を大別するとアキシャル型とラジアル型がある。本研究で取り扱う発電機はアキシャル型発電機である。アキシャル型発電機とは、回転軸に対して固定子と回転子が垂直にあり、磁力線の方向が軸と平行になる構造である。ラジアル型は回転軸に対して回転子が平行にあり、磁力線が軸に垂直となる構造である（図 3-1)。アキシャル型は構造が比較的簡単で、ラジアル型と比べて小型化がしやすい。

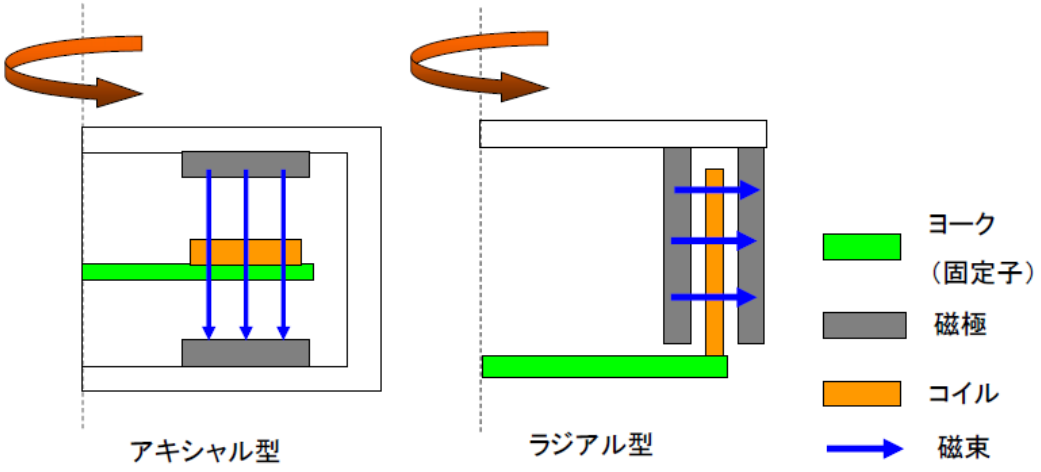


図 3-1 二種類の発電機の構造

3-3　コギングトルク

「コギングトルク」とは、一般的に「超低速で回転子を回転させた場合に生じる保持トルク」と言われる。すなわち、回転機を無励磁状態（電源を入れない状態）で外力により回転させた場合に生じるトルクのことで、「カクカク」と伝わってきた微振動のことである。このコギングトルクが大きいと、高速で回転すると振動・騒音を生じてしまいモータ効率もかなり悪くなる。

コギングトルクの原因としては、磁石と磁性体の引きつけや反発によって生じる他に渦電流も原因となる。

渦電流とは、強い磁界内で金属片を移動させたり、金属板の周りの磁界を急激に変化させた際に、電磁誘導効果により金属内で生じる渦状の電流のことである。渦電流は周囲の磁界の変化を打ち消す磁界が生じるように流れる。この電流により磁界が発生し、物体の運動を抑える力が生じて、回転を妨げることになる（図 3-2）。

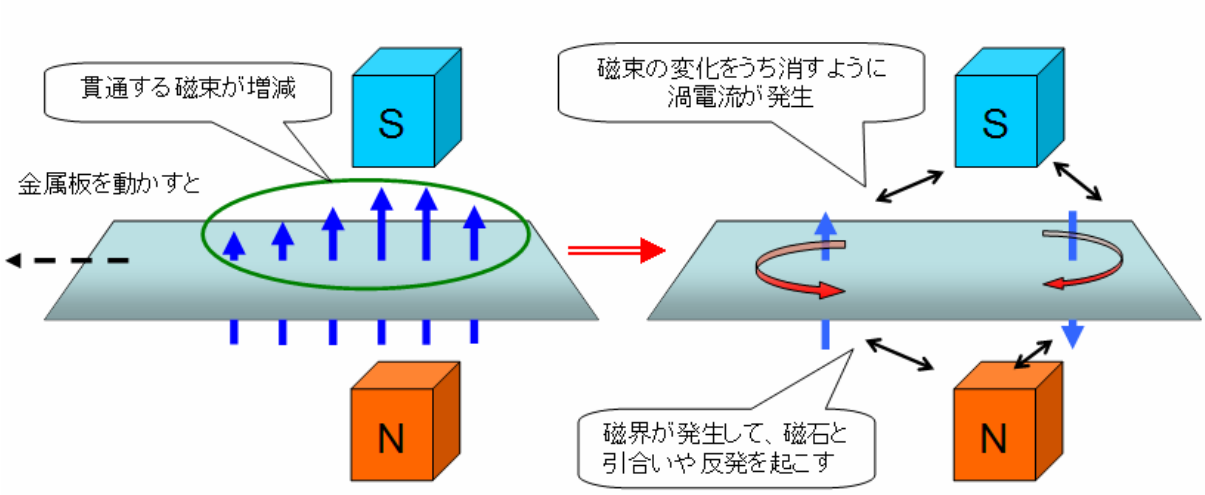


図 3-2　渦電流の仕組み

渦電流はコギングトルク以外にも熱の形でエネルギーを消耗し、無用な障害となる問題がある。このような損失を低減させるには金属部分を層状にすると効果的である。ケイ素鋼のような絶縁した薄い金属層を積み重ねると、層状の構造体は本来ならば渦電流を流れる回路を寸断し、電流を個々の層内に閉じ込めてしまう。

3-4　コアレス発電機

これまで本研究室では風力発電用のコアレス発電機の研究開発が進められてきた。

コアレス発電機とは一般的な発電機の内部にあるコイル中心に組み込まれた鉄心を取り除き、樹脂で固めることでコイルを保持し、ロータにしたものである。

コアレス発電機の特徴としては、鉄心が無いために鉄心と磁石との吸引・反発によるコギングトルクがなく回転が滑らかになる為、応答性が良い。さらに、磁束が鉄心を通ることで生じていた渦電流損が発生しないため通常のコア入りの発電機に比べ効率が良い。しかしながら、このような特徴がある反面、コアレスであるためにコイル内に磁束を導くものがなく、隣の磁石に流れる磁束が多くなり、コイルを通過する磁束密度が減る。前節で記したとおり発電機の誘起電圧はコイルの巻数、回転速度、磁束密度に比例するため結果的に発電量が小さくなってしまう（図 3-3)。小型風力発電においては平地では低風速であることや、風速が安定しない為コギングトルクが発生すると発電を行うのが難しい。その為、コアレス設計は小型風力発電には適しているといえる。

しかし、小型水力発電は小型風力発電とは違い水力の流速は風力よりも強くまた、常に安定した流速が出ている。その為、小型水力発電においてはコギングトルクが出来るだけ小さいほうが良いが発電量を大きくするためコアを入れたほうが効率の良い発電が行えると考えられる。その為、本研究ではコギングトルクができるだけ小さくなるコア入りの発電機の検討を行う。

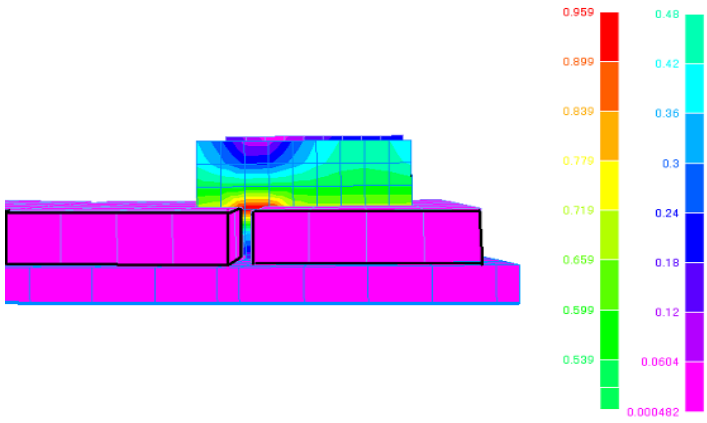


図 3-3　発電機内部の空間磁場解析

3-5　発電機の動磁場解析

本研究で使用する発電機は先に述べたようにφ250mmのアキシャルギャップ型コアレス発電機である。 アキシャルギャップ型とは回転軸（シャフト）に対して固定子（ステータ）と回転子（ロータ）が平行に設置されている発電機の構造である。逆に、回転軸に対して固定子と回転子が垂直に設置されている発電機の構造をラジアルギャップ型と呼ぶ。

一般的な発電機の内部には、コイルの中心に鉄心が組み込まれている。これは磁石から出た磁束をうまく導くためである。しかし、同時に発電機の回転に必要なトルク数（コギングトルク）も増えてしまう。この鉄心を取り去りさったものをコアレスという。

つまり、コアレスコイルは起動トルクが少ない必要のある風力発電用の発電機で有効で、常に高トルクの得られる水力発電ではコアの入った発電機のほうが効率がよいと考えた。そこで本研究室にある CAD ソフトと動磁場解析のソフトを使用し２つのモデルを作成し検討した。

使用したソフトはELF/MAGIC、EGmapである。EGmap が解析用のモデリングソフトである。

動磁場解析に利用したソフトは株式会社エルフの ELF/MAGIC である。本ソフトは「積分要素法（IEM)」を用いた 3 次元非線形磁場解析プログラムである。有限要素法(FEM)などに必要な空間メッシュ・境界条件・ゲージ条件など必要としないため、データ作成が簡単であり、短時間で計算を行うことができる。本研究で使用する解析モデルでは、解析時間は 1 ケースで約 30 分程度である。

ELF/MAGIC で使われている主な積分要素法の計算式は以下の通りである。積分要素法では各要素についての連立積分方程式を立てて、ソースを求めている。磁場はソースが作る磁場の総計を、クーロンの法則、ビオサバールの式を使って計算する。力やトルクは、まず磁場を計算し、マクスウェルの応力式で計算している。

マクスウェル応力式は

$$\vec{p} = \left(\vec{B}\cdot\vec{n}\right)\vec{H} - \frac{1}{2}\left(\vec{H}\cdot\vec{B}\right)\vec{n}$$

H_n：磁場Hの法線成分

n：放線方向の単位ベクトル

H ：磁界強度

μ ：比透磁率

B ：磁束密度

で表される。

トルクを求めるにはELF/MAGIC では、

$$\vec{F} = \sum s\vec{p}$$

$$\vec{T} = \sum \vec{r} \times S\vec{p}$$

Σ：ベクトルの和

***S*：マクスウェル応力面要素の面積**

***r*：要素の中心点の位置ベクトル**

で表される。

誘導電流の計算方法としては電気回路についての関係式、誘導起電力についての関係式を変形した下記の式が ELF/MAGIC では使用されている。

$$I_{ind} = -\frac{N}{R} \cdot \frac{\sum_k \Delta\Phi_k}{\Delta t}$$

$$I = I_0 + I_{ind}$$

$$E = -R \cdot I_{ind}$$

ちなみに、積分要素法の計算方法は本研究の解析ではすべての非線形計算に際してニュートン・ラフソン法、を使用しており最大計算回数は３回、許容誤差は 0.01 である。

3-6　解析モデル

下図に本研究で解析をおこなったφ250mm 発電機の解析モデルを示す。主にバックヨーク、磁極、コイルの要素をモデル化する。モデルは解析時間短縮のために対称性を利用し、形状の簡略化ができる。半径方向に 6 分の 1、軸方向に 2 分の 1 で計 12 分の 1 の分割モデルで解析を行った。磁石とバックヨークを回転子、コイルを固定子としている。

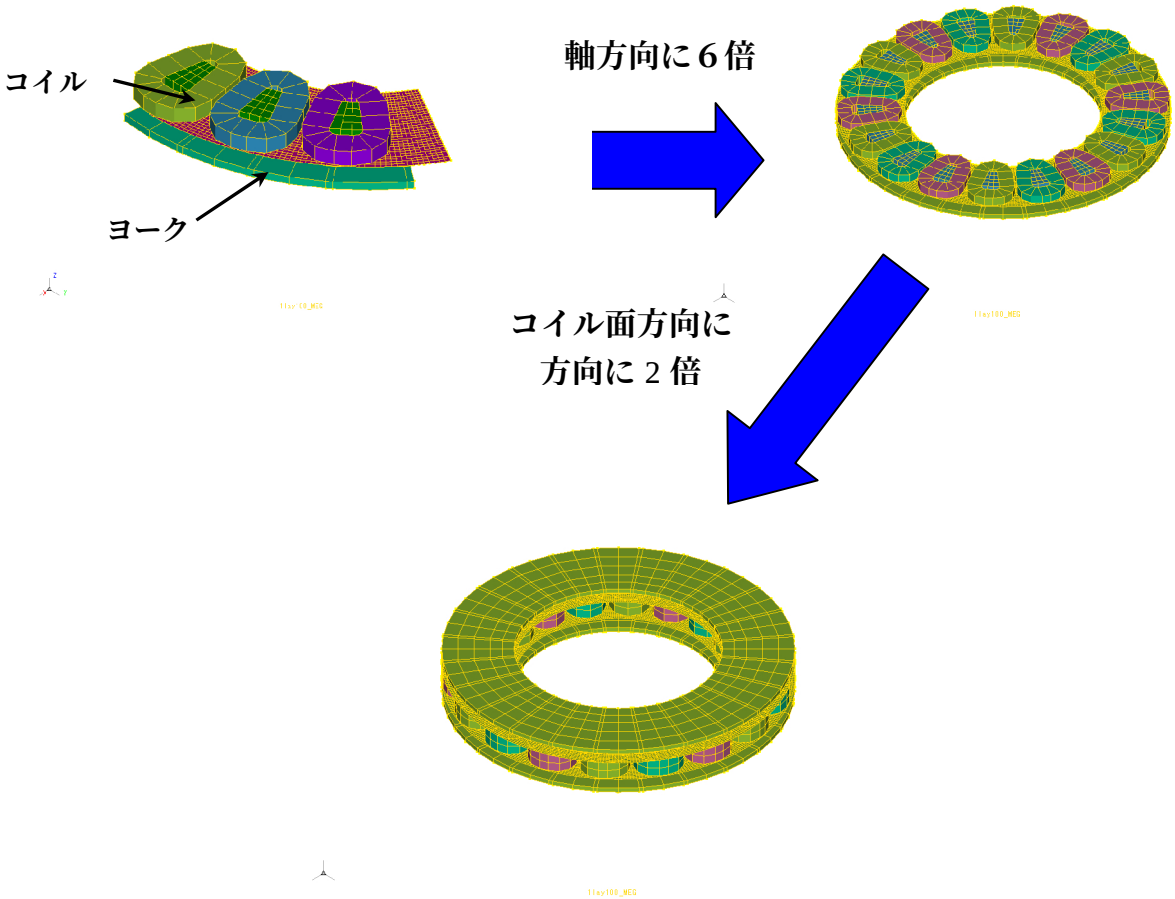


図 3-6　発電機の各分割モデル

解析では磁極に Nd-Fe-B 希土類永久磁石、バックヨークに鉄 SS400 を使用している。それぞれの磁化特性を図 3-7、図 3-8 に示す。

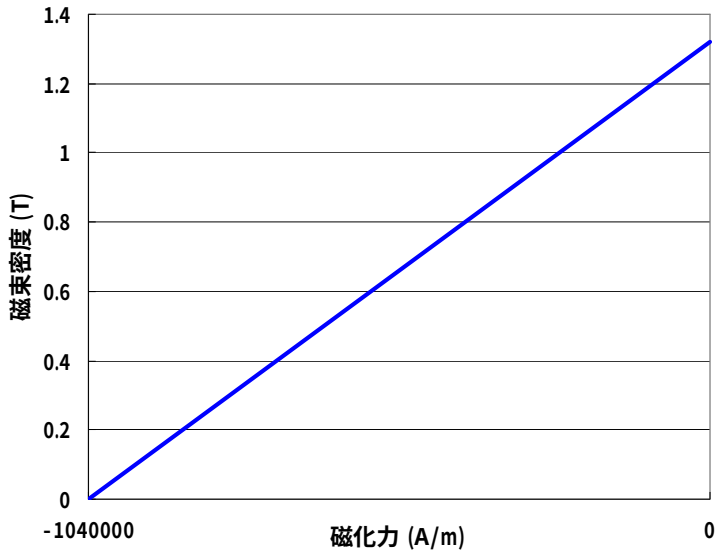


図 3-7　Nd-Fe-B 希土類永久磁石の磁化曲線
（株式会社 NEOMAX カタログ「希土類磁石」より）

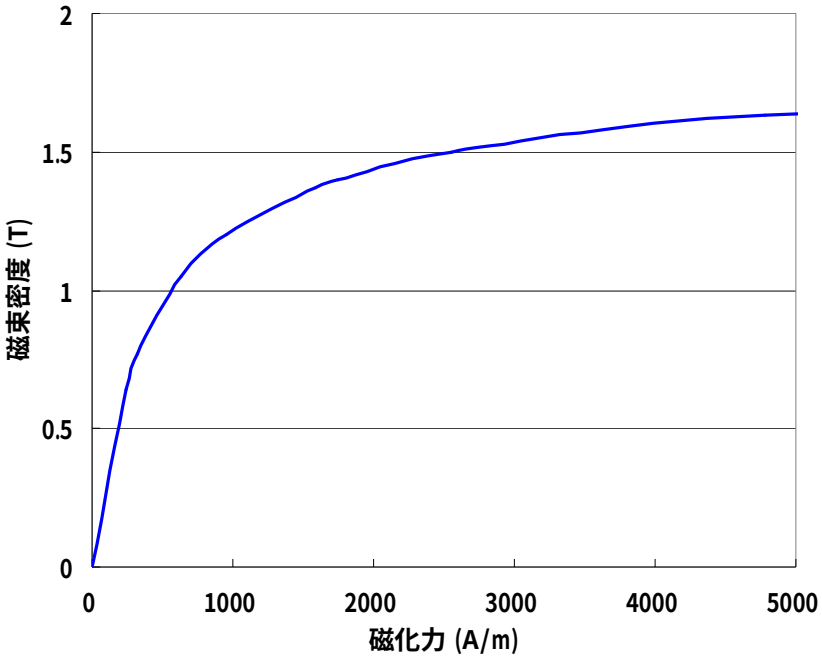


図 3-8　SS400 の磁化曲線
（社会法人日本溶接協会・資料より）

3-7　鎖交磁束からの誘起電圧の計算

ELF/MAGIC による解析によってコイルの端子を開放してロータを回転させた時に発生するトルクと鎖交磁束をステップごとに計算することが出来る。また、U 相、V 相、W 相の電流の入力値を０（A）としたときのトルクがコギングトルクとなる。
誘起電圧の求め方はフーリエ級数、中間差分を使った座標の絶対変換と相対変換により求めた。

求め方は以下の通りである。

ステップ n のときの鎖交磁束をΦn(Wb)とすると誘起電圧の瞬間値 En（V）は中間差分で計算すると以下のようになる。

$$E_n = -\frac{\phi_{n+1} - \phi_{n-1}}{2\Delta t} \qquad \Delta t : \text{時間幅（ｓ）}$$

時間幅⊿t 以下のように求める。

$$\Delta t = \frac{x}{6N} \qquad \begin{array}{l} x : 1Step\text{あたりの回転角（deg）} \\ N : \text{回転角}(rpm) \end{array}$$

この誘起電圧の最大値を U 相、V 相、W 相それぞれにおいて Vu、Vv、Vw として絶対変換すると、

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_d & \sin\theta_d \\ -\sin\theta_d & \cos\theta_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix}$$

電気角 θ_d の基準は U 相の鎖交磁束が最大となる角度を 0 度とする。

V_d、V_q の平均値をそれぞれ線間電圧の実行値 Vu の d 成分、q 成分とする。

$$V_u = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}$$

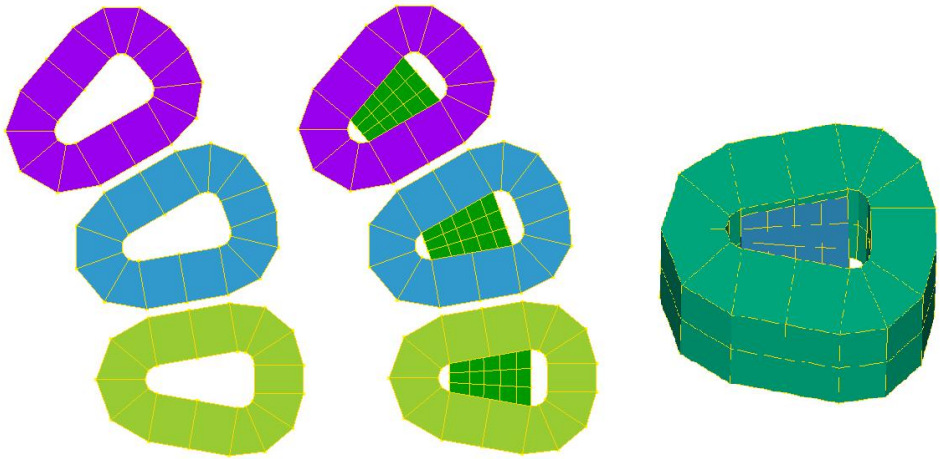
各相の誘起電圧の実効値は線間電圧の実行値の√３分の１の値となる。

第 4 章　コアの厚みが及ぼす発電性能への影響

4-1　コアの厚み

前述したようにコギングトルクを出来るだけ抑える為に、コイル内にコアを配置することを検討した。そして、発電量を上げつつコギングトルクを抑えるためのコア形状が考案された。その結果、コイル中心に薄板状のコアを挿入することが適当であった（図 4-1)。しかし、その板状コアの厚みに対する解析は不十分で、まだ検討の段階にあると感じた。

そして、板状コアの厚さが発電性能に及ぼす影響について解析を行った。解析対象となる発電機内のコイルの厚みは 20mm なのでコア厚さを 1mm から 20mm までとして解析した。



(a)　　(b)

図 4-1　(a)コアレスコイル、(b)薄板状コアを挿入したコイル

4-2　解析モデル

・対象モデル

- ◆ φ250mm 発電機
- ◆ 磁極厚さ　8mm
- ◆ ヨーク厚さ　3mm
- ◆ 磁極間距離　2.31mm
- ◆ 巻数 66 巻
- ◆ コアの厚さ　0～12mm
- ◆ 磁極コイル間の距離　0.5mm

・解析条件

- ● 回転数 300rpm
- ● 軸方向 1/2 モデル

- 半径方向 1/12 モデル
- 磁極とヨークを回転子

4-3　解析結果

1) 電圧値

図 4-2 に電圧値の解析結果を示す。それぞれのコアの厚さに対する誘起電圧の実行値をとっている。

コア厚さの増加とともに電圧値も一様に増加している。コアの厚みを 12mm としたとき、コアレス(0mm)と比較して電圧値は約 2 倍に増加する。

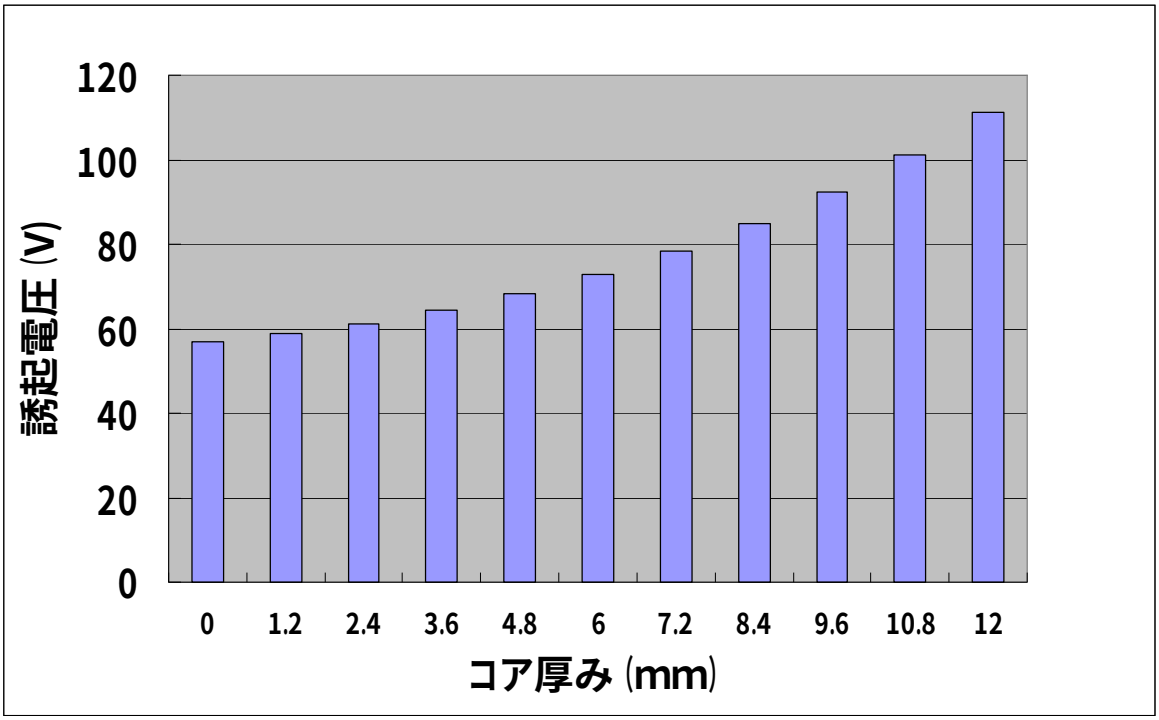


図 4-2　コア厚さに対する最大電圧値の比較

2) トルク値

図 4-3 に各コア厚みによるそれぞれの各回転角度におけるトルク値を示す。 図 4-4 はコア厚み変化によるトルクの最大値の変移を表す。

グラフを見ると、コア厚さ 2.4mm まではトルク値は極めて小さく、0 の値で横ばいとなるのでコギングトルクの発生が無いといえる。7.2mm を超えたあたりから値は緩やかに増加をはじめて、8.4mm を過ぎると値の増加量が多くなり、変移のカーブは大きく上昇する。コア厚み 7.2mm のトルク程度であれば、トルクが大きく得られる小型水力発電ならば支障がないと思われる。

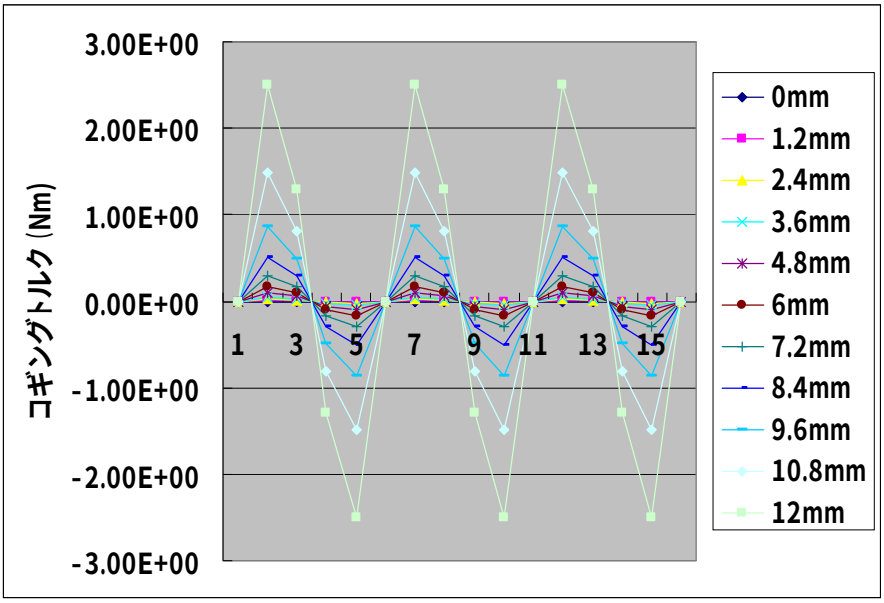


図 4-3　各回転角度におけるトルク

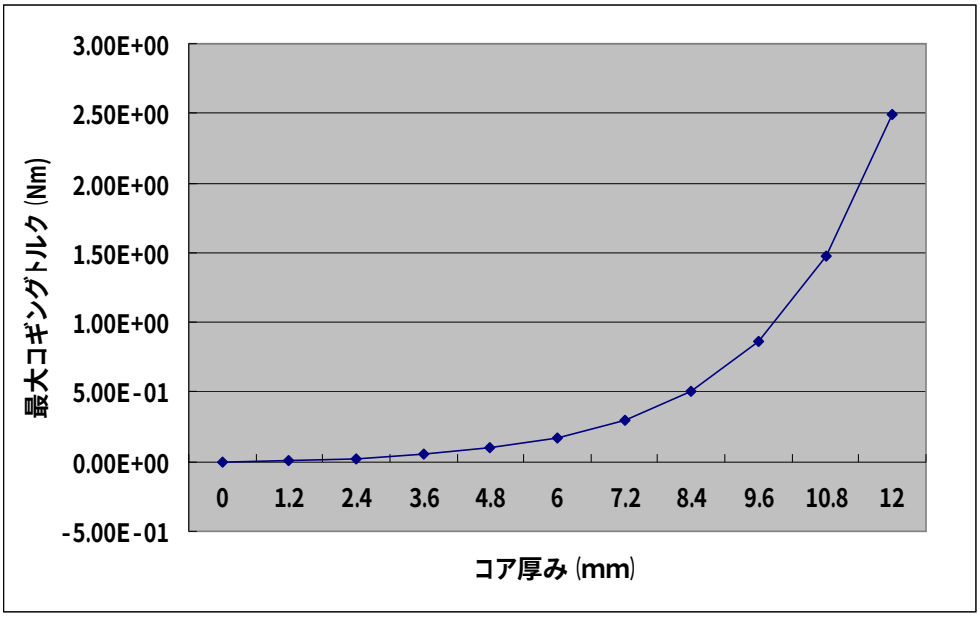


図 4-4　コア厚みによるトルク最大値の変移

4-4　動磁場解析の有効性（実験結果と数値解析値との比較）

動磁場解析は、開発の効率化向上のために欠かせないツールである。しかし、実験結果とどれほど近似しているかを調べる必要がある。実験結果と近似しているということが証明できたならば、実験を行わなくてもシミュレーション上で定性的な値を求めることができる。その結果を利用して、開発期間の短縮・コストの削減が可能になる。

そこで、先に解析を行った発電機からコア厚み 9.6mmと 7.2mmの発電機の製作をして無負荷状態時における実験結果と数値解析結果との値の比較を行った。

4-5　実験

モータを使って発電機の性能評価を行った。実験方法は発電機をダイオードブリッジにより整流してその時の電圧値を求めた。図 4-5 は実験の回路図である。実験を行った発電機の仕様は表 4-6 に示す。

・回転数は直流モータの速度調整で一定に保つ
・直流モータから発電機の軸トルクを測定し、軸トルクと回転数から発電機への入力電力を計算で求める
・発電機の出力は三相ダイオードブリッジを通じて負荷に供給される。出力電圧、電流、電力は三相ダイオードの出力側をディジタルパワーメーターで測定する。負荷は可変抵抗により加減する。なお、回路図の R’は、無負荷時のダイオード出力電圧測定用の高抵抗で負荷としては無視できる。

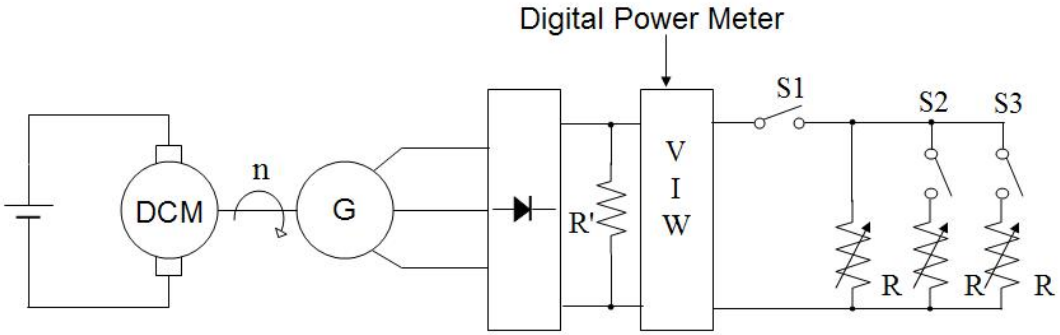


図 4-5　実験回路図

表 4-6　実験の発電機の仕様

発電機直径	コイル線径	巻数	コイル厚み	コイル磁石間距離
250 mm	0.8 mm	66 t	12 mm	0.5 mm

4-6　比較結果

解析により各回転数における三相交流電圧が求まる。そのデータを実験値と比較するためには、実効値に変換する必要がある。実効値への変換は次式より行った。

$$実効値(V) = \frac{最大電圧値(V)}{\sqrt{2}} \qquad (9)$$

表 4-7 と図 4-8 は実験値と解析値(実効値)の比較である。グラフからも分かるように、実験値と近似した結果を得る事ができた。これにより、本ソフトを利用して発電機の性能向上に関する検討を行えることが確認できた。

表 4-7　各コア厚みにおける実験値と解析値

コア厚み (mm)	7.2	9.6
実験値 (V)	83.69	95.57
解析値 (V)	78.2598529	92.41100746

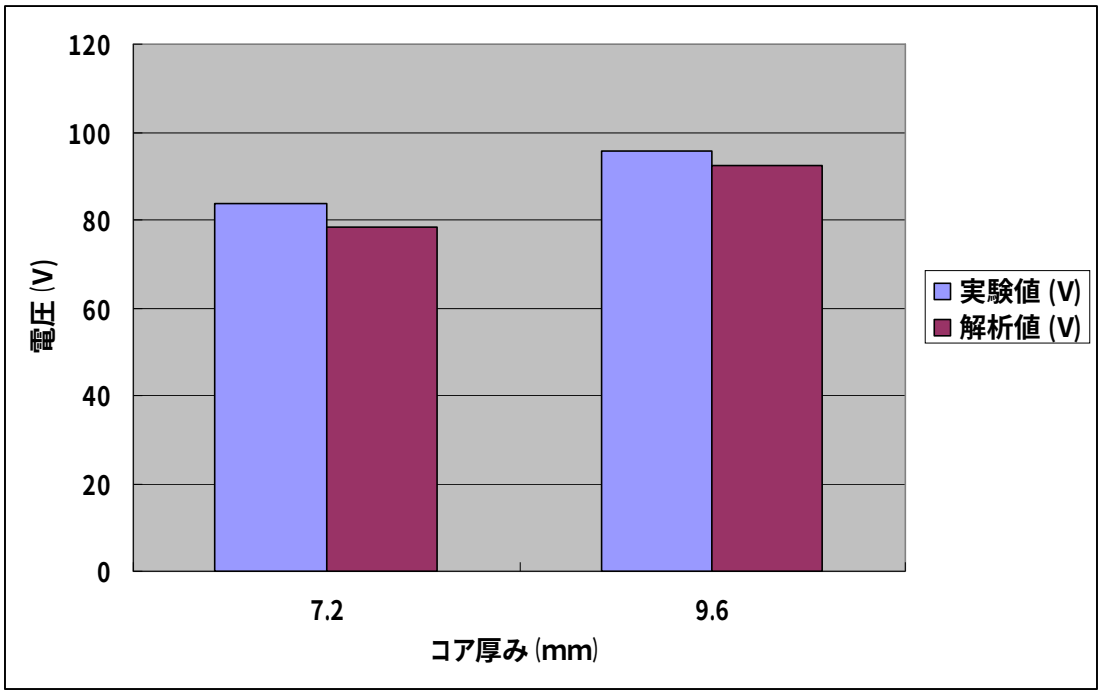


図 4-8　実験値と解析値の電圧比較

4-7　発電機の負荷実験

解析の有効性を求めると同時に発電機の負荷実験を行いコア厚み 7.2mmと 9.6mmの発電機の性能を調べた図 4-9 と 4-10 は各回転数の時の負荷抵抗と出力電力の関係を表わしている。図 4-9 と図 4-10 から見ても分かるように負荷抵抗が小さく回転数が早ければ電力は上がりコアの厚みの差が良く現れる。ちなみに、回転数 300rpm、負荷抵抗 11Ωのときのコアレス発電機の電力は約 300W で、コア厚み 7.2mmのときの発電量は約 135%、コア厚み 9.2mmのときの発電量は 165%増加した。

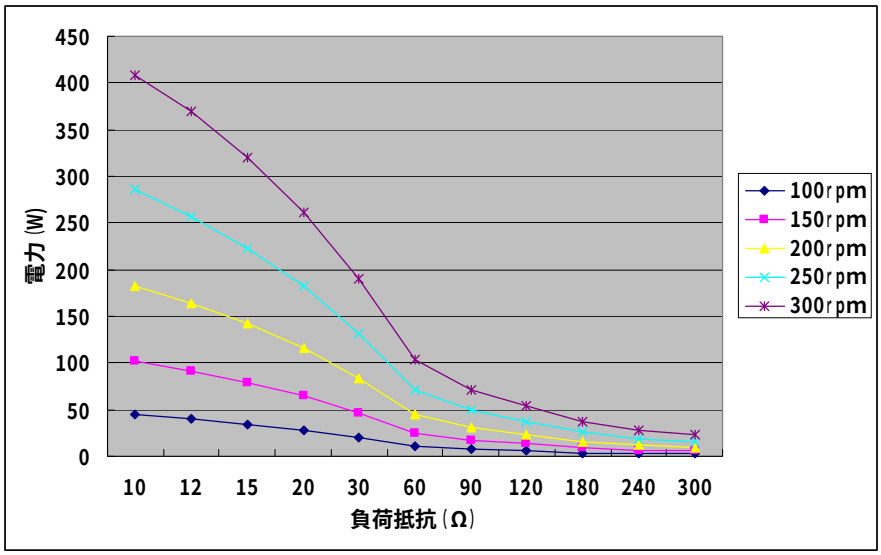


図 4-9　コア厚み 7.2mm発電機の出力電力

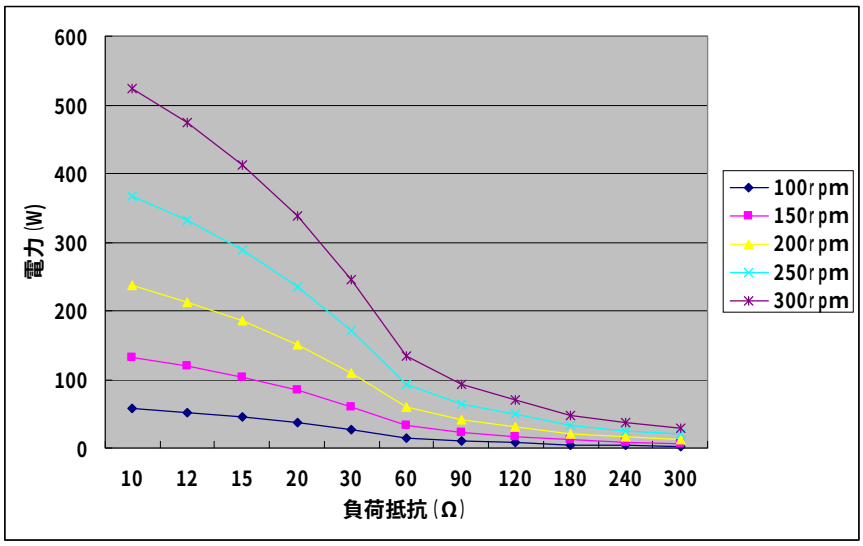


図 4-10　コア厚さ 9.6mm発電機の出力電力

続いて発電効率の面から考える。発電効率の求め方は

$$\frac{\text{発電機からの出力電力}(W)}{\text{モータの使用電力}(W)} \times 100 \quad (\%)$$

で求めた。計算の結果は以下のようになる。

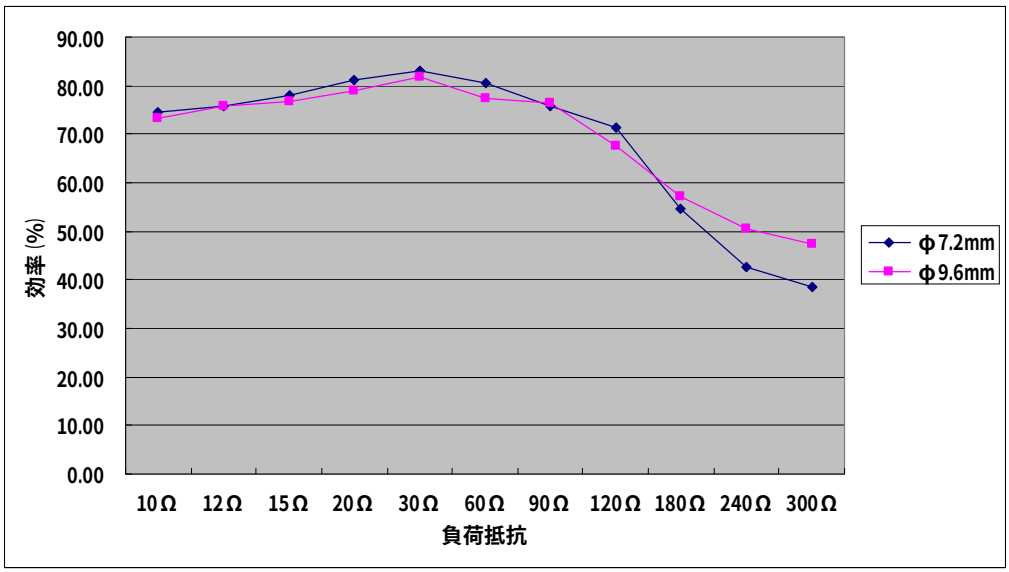


図 4-11　発電機の効率

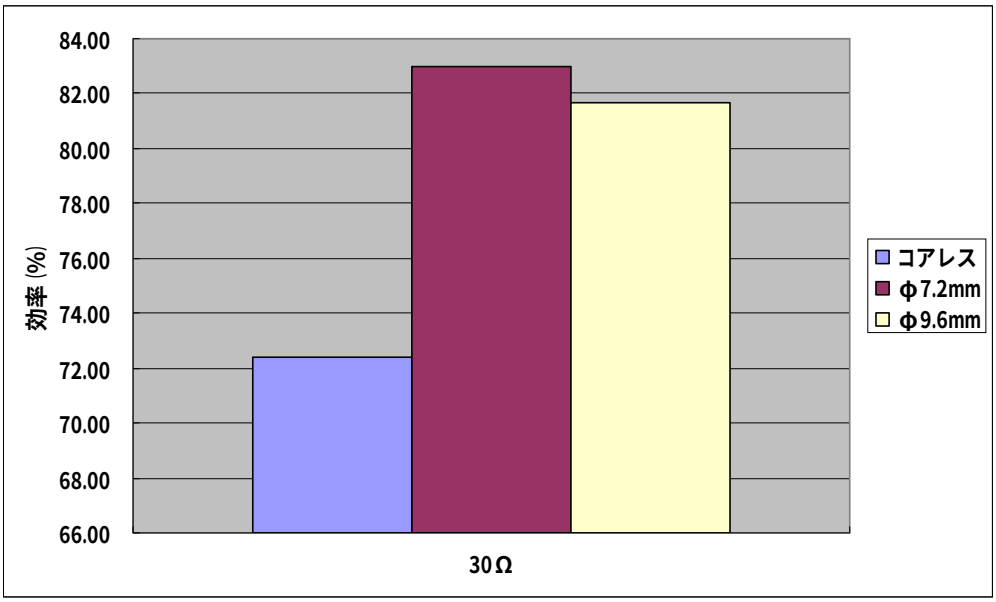


図 4-12　コアレスとの効率の比較

図 4-12 の結果よりコアを入れた発電機の効率は約 13%～15%コアレスより向上したことが分かる。

4-8　磁束密度の可視化

発電機のコアの厚みによりゴギングトルクと誘導電圧が変化するという結果が前節の解析、実験結果により確かめられた。そこで、この変化の原因を調べるために動磁場解析により発電機によって発生する磁束密度の可視化を行った。

解析モデルは図4-13のようなモデルで半径90㎜（半径中心付近）の位置で厚さ1㎜の円筒状の部分を取り出し、その部分だけ細かいメッシュを作成した。モデル全体を細分メッシュで作成すると膨大な計算時間がかかってしまう。磁束密度ベクトルの分布は平面で調べるため、このようなコンター面周辺の部分的な細分メッシュで十分である。

図 4-13　可視化解析モデル

半径90㎜の位置に円筒状のコンター面を作成し、ベクトルポテンシャルの等高線を描いた。

等高線と磁束線は厳密には異なるが、磁束の流れについておおよそ知ることができる。

磁束について、２次元問題では等高線と磁束線が一致する。その為、コンター面を平面にするためにモデルを図のように並列化させる必要がある。EGmapではモデルの座標点は直交座標（x,y,z）で入力を行っている。そこで、エクセルで直交座標を円筒座標（r, θ ,z）に変換し座標の書き換えを行った。詳しい変換方法は以下の通りである。

直交座標(x,y,z)と円筒座標(r, θ ,z)の関係は図4-14のようになる。

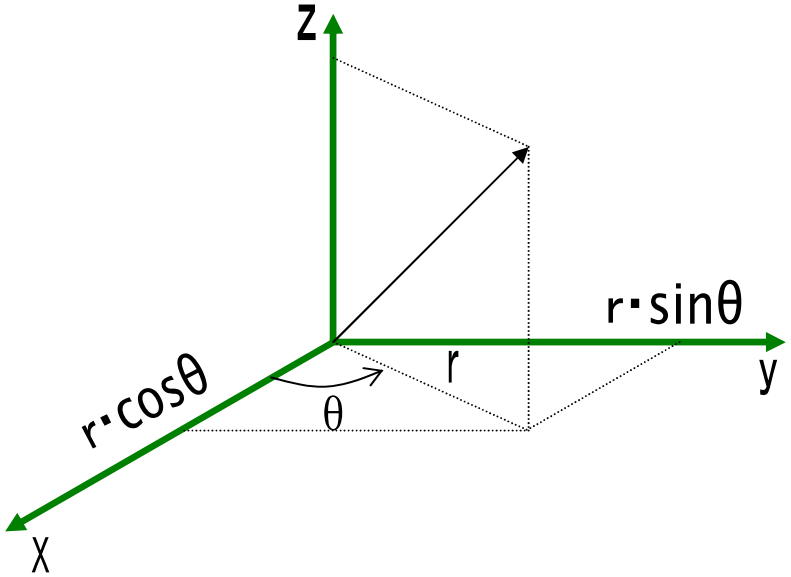


図4-14　ｘ-ｙ-ｚ座標

ｒはx,yを利用すると三平方の定理より以下のようになる。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad \cdots\cdots(1)$$

θについて直交座標と極座標との関係より以下が成り立つ

$$\frac{y}{x} = \frac{r\sin\theta}{r} \bullet \frac{r}{r\cos\theta} = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \tan\theta$$

θを逆関数で表すと

$$\theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} \qquad \cdots\cdots(2)$$

このモデルではコンター面を半径 90mmのところに作っているため。座標を

$$\left(\sqrt{x^2 + y^2} \quad 90 \bullet \tan^{-1}\frac{y}{x} \quad z \right)$$

とエクセルで変換した。すると、上記の図のモデルは図 4-15 のようになった。また、解析条件において回転速度は 300rpm であったが変換後は回転運動ではなくなるので並進の等速直線運動への変換を行った。速度Ｖの計算方法は以下の通りである。

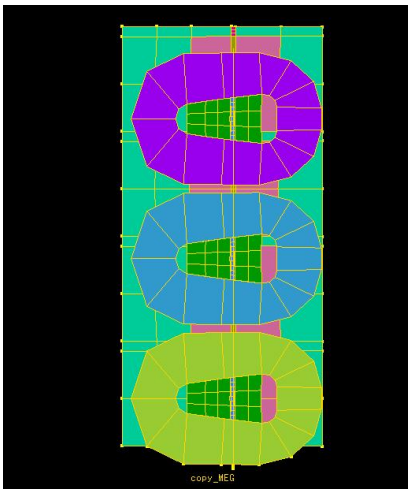


図 4-15　変換後の解析モデル

$$V = \frac{2r\pi \times N}{60} \quad (\mathrm{m/s})$$

ｒは基準面までの半径でＮは解析モデルの回転数（ｒｐｍ）である。
以下の計算により作った解析モデルと解析条件は下記の通りである。

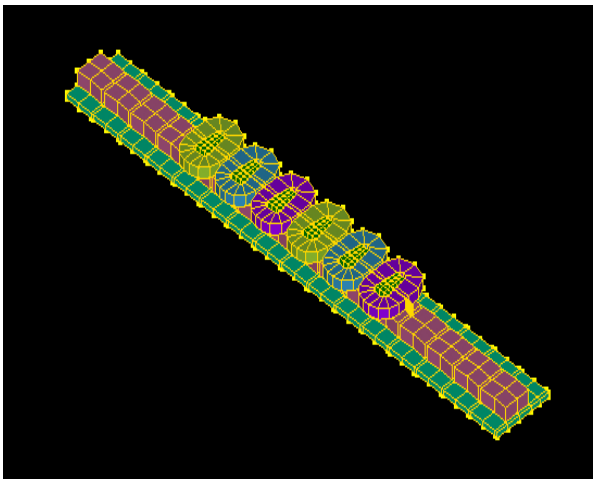


図 4-16　解析モデル

・対象モデル
- φ250mm 発電機
- 磁極厚さ　8mm
- ヨーク厚さ　3mm
- 磁極間距離　2.31mm
- 巻数 66 巻
- コアの厚さ　0～12mm
- 磁極コイル間の距離　0.5mm

・解析条件
- 速度 2.827433　m/s
- コアの厚さを 0 から 1.2mmずつ増加させる

解析結果は以下のようになる。図 4-17 と図 4-18 は中心から 90mmのところに置いたコンター面の空間磁束密度を表している。等高線の間隔は磁束密度の変化の度合いを表し、狭い箇所ほど磁束密度の変化が大きくなる。等高線の色は赤い箇所ほど磁束密度の値が大きく、青い箇所ほど値が小さい事を示す。等高線の数は調整が可能で図では磁極 1 個から 20 本の等高線を出している。

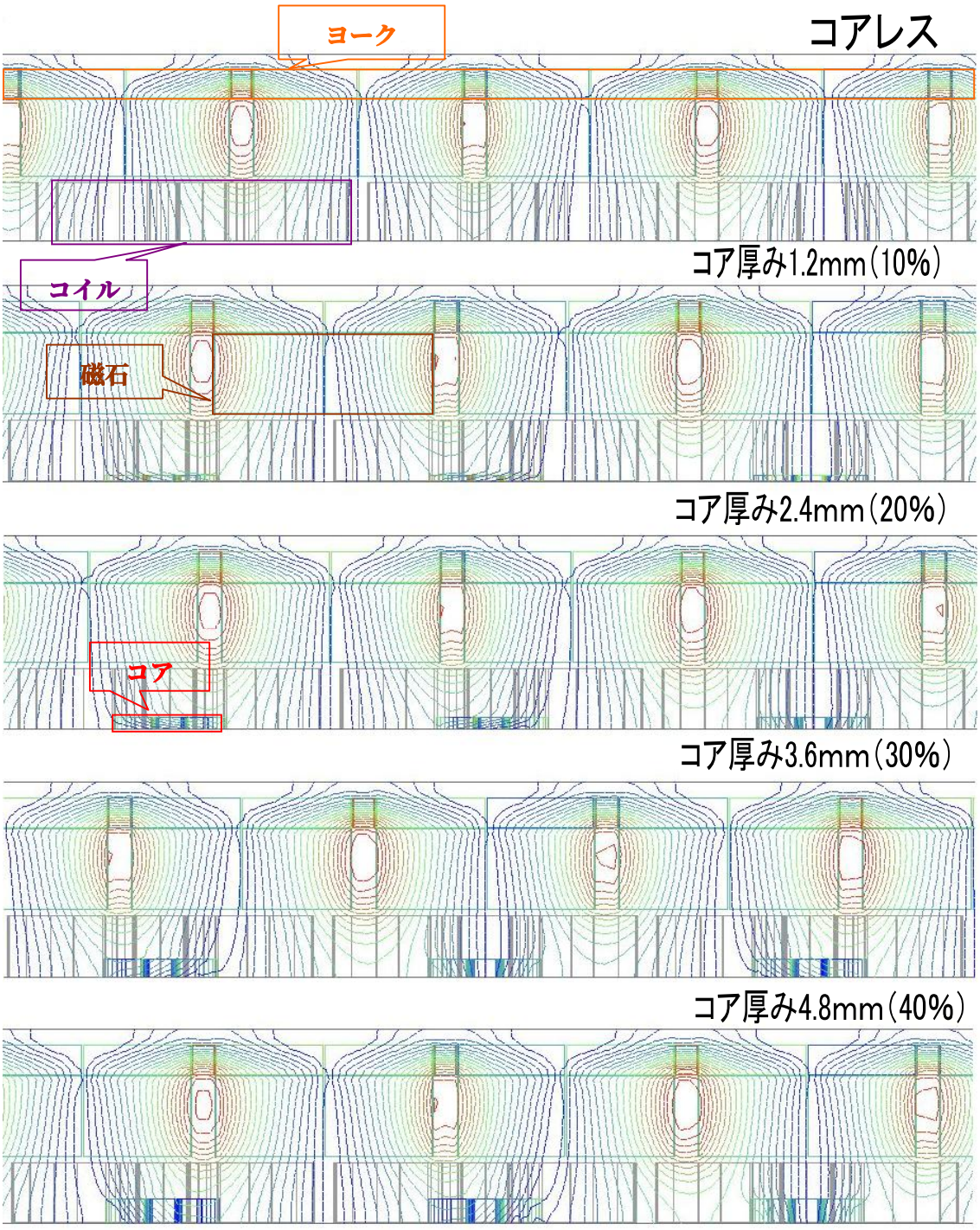


図 4-17　コア厚み０mm～4.8mm発電機の可視化

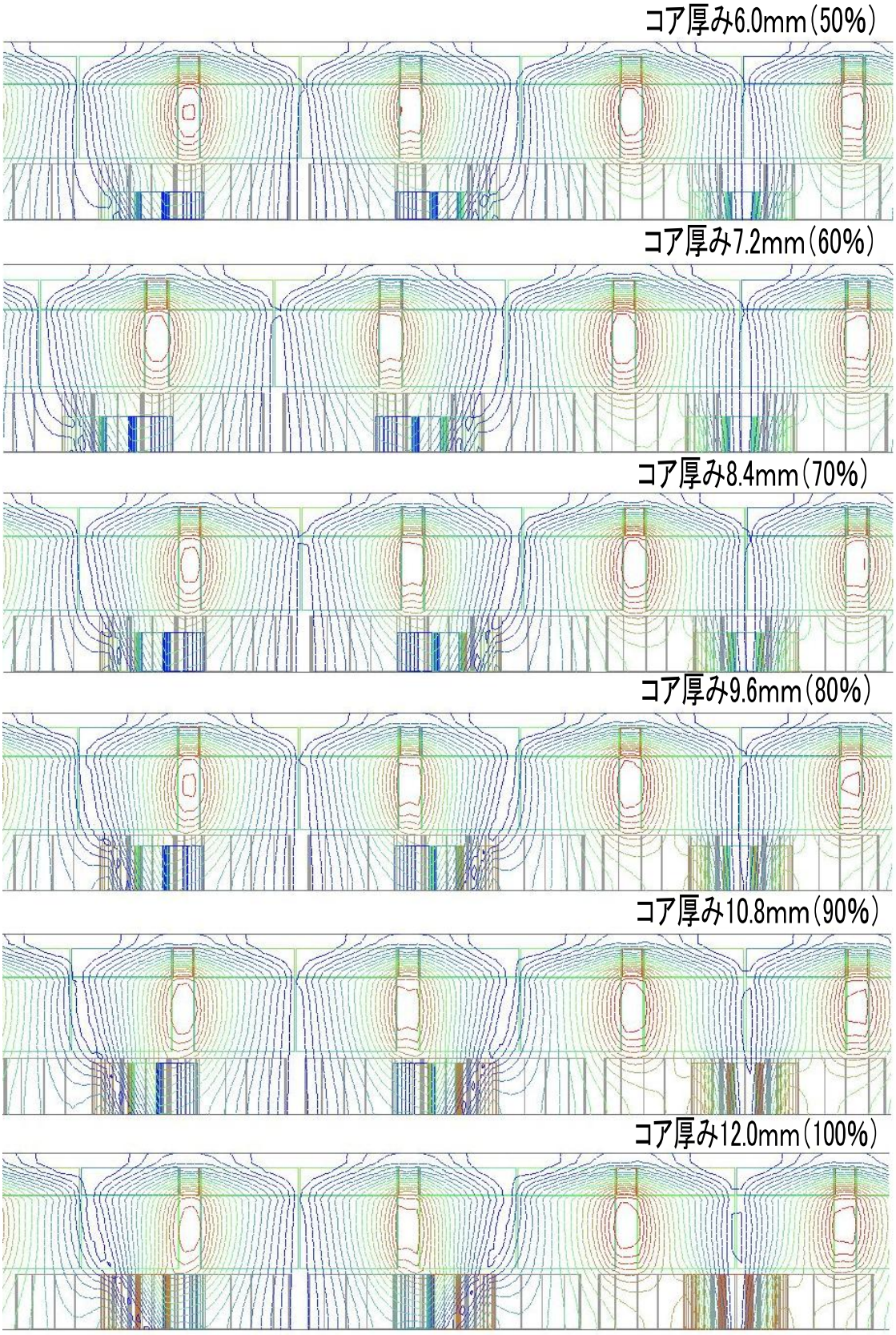
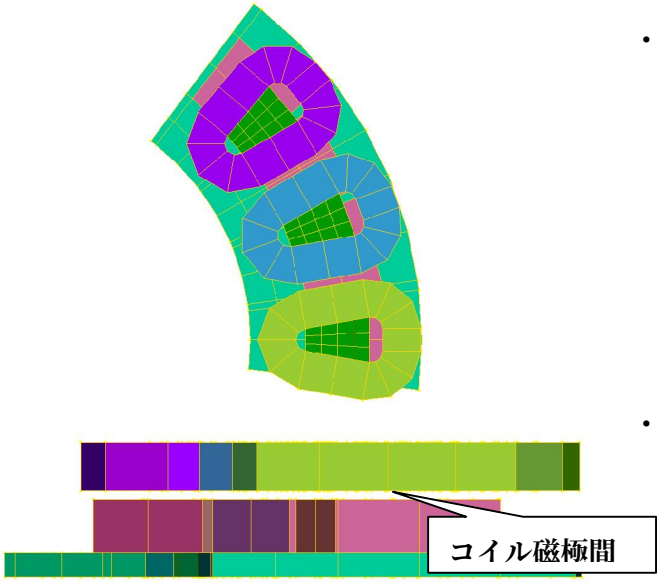


図 4-18　コア厚み 6.0mm～12.0mm発電機の可視化

図 4-17 と図 4-18 を見ても分かるとおり磁束密度は磁極と磁極の間が最も強いことが分かる。しかし、コアが付くことによってその磁束がコアに導かれていることがコア部分の等高線がみだれた変化をしていることによってわかる。また、このコアに乱されている等高線はコアの厚みが高くなるにつれて大きくなっていることがわかる。このことより、コギングトルクの大きさはコアに導かれる磁束の強さ、つまりコアと磁極の距離が原因であると考えられる。

この仮説を確かめるためコイルと磁極間の距離を 0.5mmから２倍の 1.0mmに広げた解析モデルを作り前回と同じ条件で解析を行った。解析条件、0.5mmと比較した解析結果は以下の通りである。（図 4-19～4-21 参照）



・対象モデル
- φ250mm 発電機
- 磁極厚さ　8mm
- ヨーク厚さ　3mm
- 磁極間距離　2.31mm
- 巻数 66 巻
- コアの厚さ　0～12mm
- 磁極コイル間の距離　0.5mm

・解析条件
- 回転数 300rpm
- 軸方向 1/2 モデル
- 半径方向 1/12 モデル

図 4-19　解析モデル

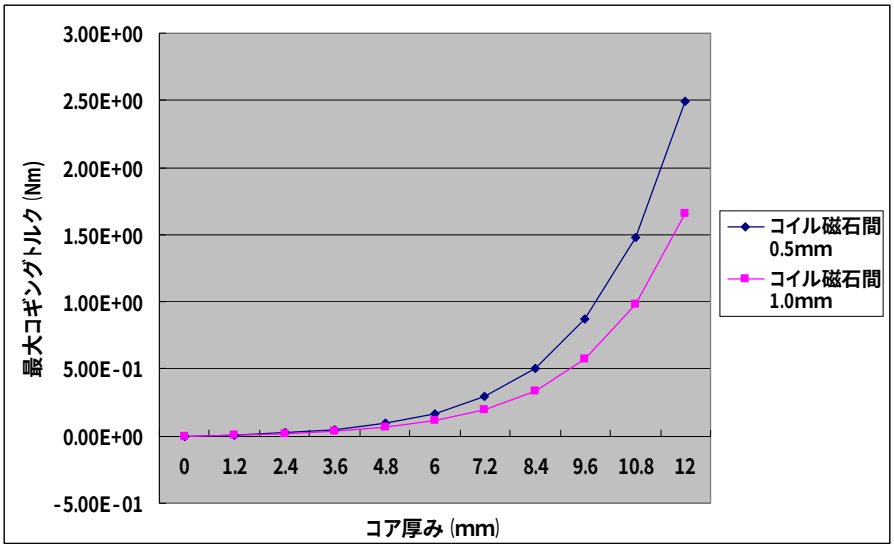


図 4-20　最大コギングトルクの比較

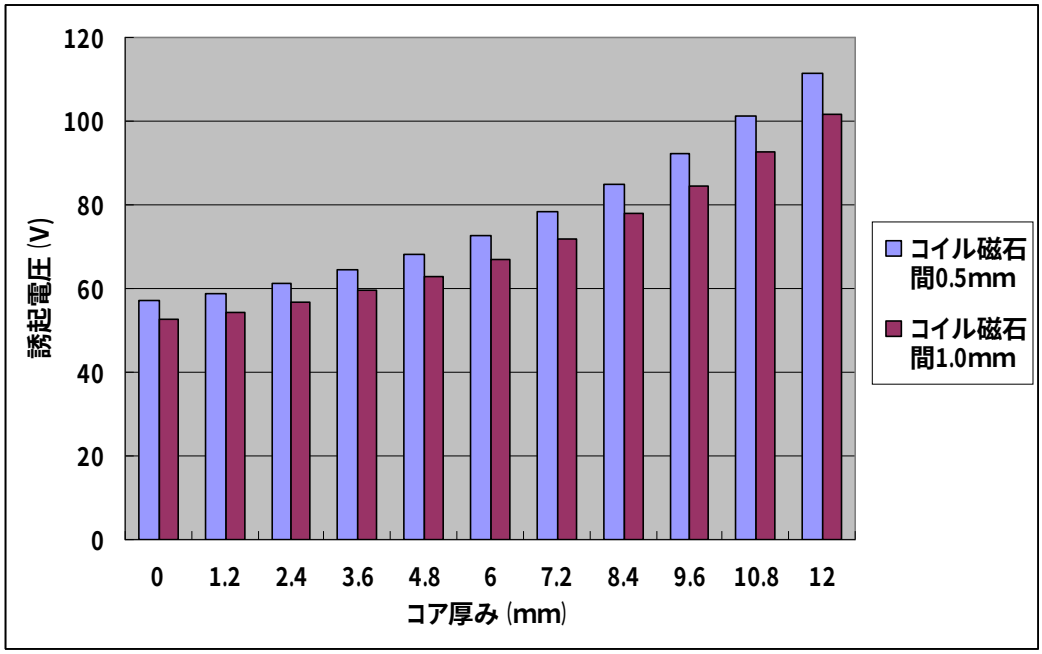


図 4-21　誘起電圧の比較

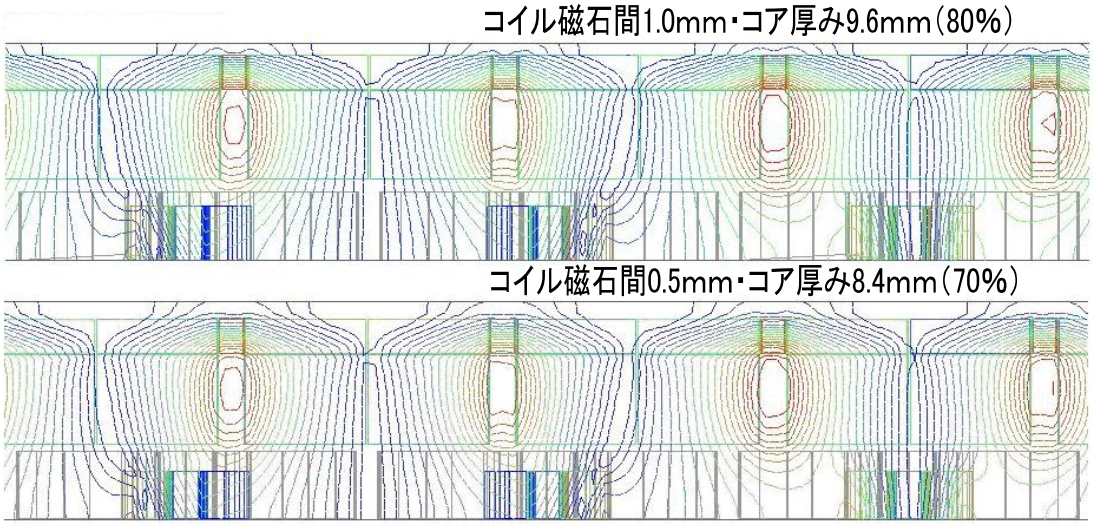


図 4-22　磁束密度の比較

解析結果の通りコギングトルク、誘起電圧共にコイル磁石間の距離が狭いほうが大きくなった。また、グラフよりコイル磁石間 1.0mm時のコア厚み 9.6mmの場合とコイル磁石間 0.5mm時のコア厚み 8.4mmの場合のコギングトルク、誘起電圧はほぼ同じである。そこで、先ほどの可視化図によって磁束密度を比較すると図 4-22 のように等高線の乱れはほぼ一致する。以上のことより誘起電圧の大きさは磁石とコイルの距離に比例するといえる。コギングトルクは誘起電圧と違いある一定の地点まではほとんど発生せず一定地点から大きく発生していくことがわかる。

考察

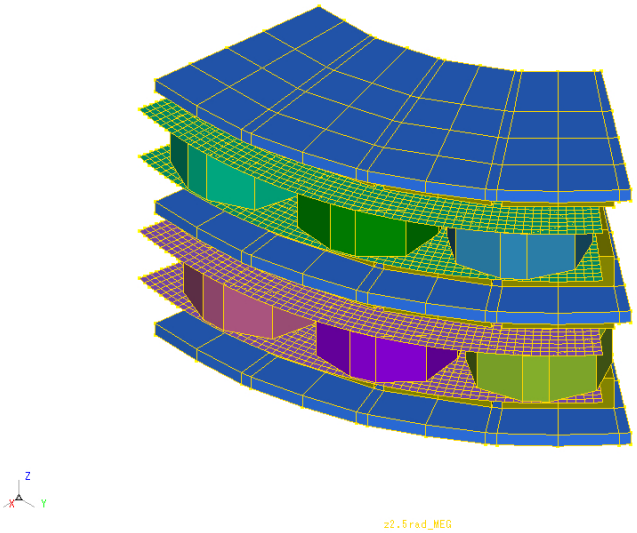
よって、本研究の効率の良い発電機を作るためにはコイルと磁石の距離を出来るだけ近づけること、コイルの中のコアを 60%程度とることによってコギングトルクを発生させずに発電量を大きくすることが出来ると考えられる。ただし、この値はコイル磁石間の距離、磁石の性能等により変化する為、動磁場解析により最適値を導く必要がある。その為、動磁場解析が発電機開発の為の有効なツールであるといえる。

第 5 章　二層型発電機

5-1　コイルのずれによる発電効率への影響

これまでの動磁場解析の結果から発電機のコギングトルクが一定周期によって起こっていることがわかる。その為、現行のアキシャル型発電機を二層にして、コイルや磁石をずらすことでコギングトルクを打ち消すことができるのではないかと考え、動磁場解析を行った。

まず、コイルをずらした場合の解析を行った。モデルは図 5-1 の通りでコイル厚さ 12mm、磁石厚み 8mm、コア厚さ 12mm、コイルと磁石の間隔 0.5mm、コイル：磁石＝18：24 であり、対象条件を使い 1/6 モデルで解析を行った。解析範囲はコイルが 18 個あるため一つあたりの角度が 20 度である。そのため、コイルを 0 度から 20 度までの間で行った。しかし、発電機のコギングトルクを調べると回転角 5 ° の時のコギングトルクは 0 ° の時と同じになることになることが分かった。以下５ ° ごとで同じコギングトルクをとる。つまり、コイルをずらした場合のコギングトルクの変化の周期は 5 ° であると考えられる。コイルをずらした場合のコギングトルクは解析の結果、コギングトルクは上コイルと下コイルにおいては図 5-2 のように違う値を示した。図 5-3 は 0 ° から４ ° までのコギングトルクの変化を表わす。



・対象モデル
- ◆ φ250mm２層発電機
- ◆ 磁極厚さ　8mm
- ◆ ヨーク厚さ　3mm
- ◆ 磁極間距離　2.31mm
- ◆ 巻数 66 巻
- ◆ コアの厚さ　12mm
- ◆ 磁極コイル間の距離　0.5mm
- ◆ 上下コイルの差　0 ° ～20 °

・解析条件
- ● 回転数 300rpm
- ● 半径方向 1/6 モデル

図 5-1　２層型発電機解析モデル

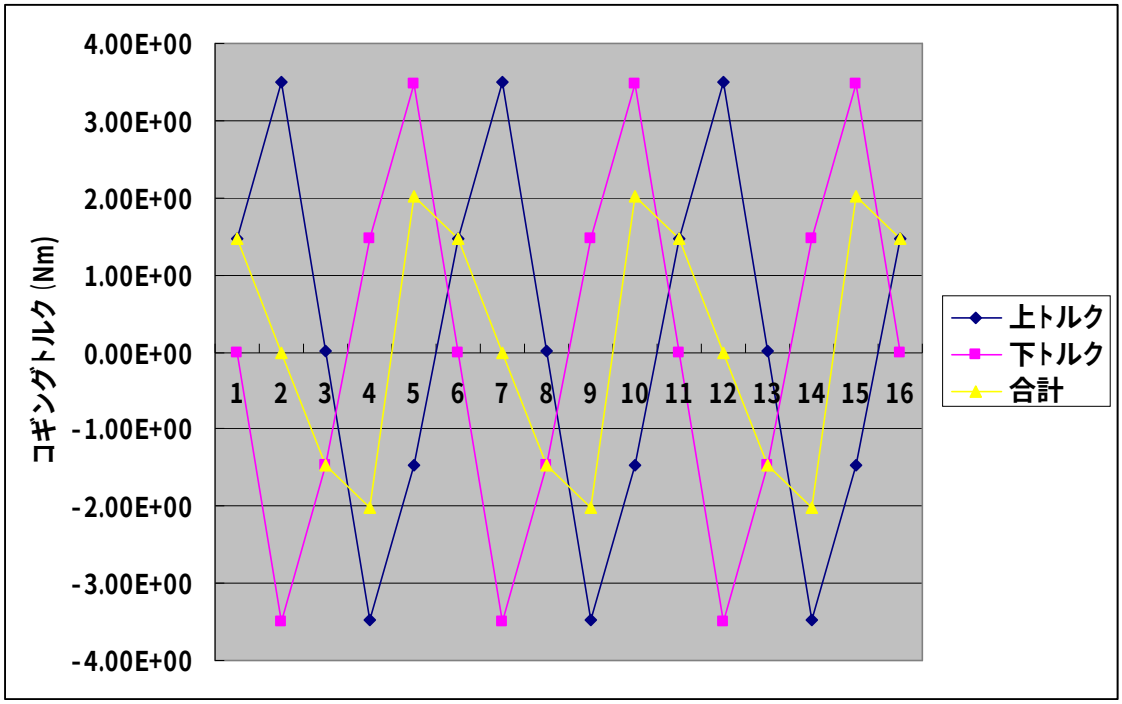


図 5-2　コイル２°ずれ時のコギングトルク

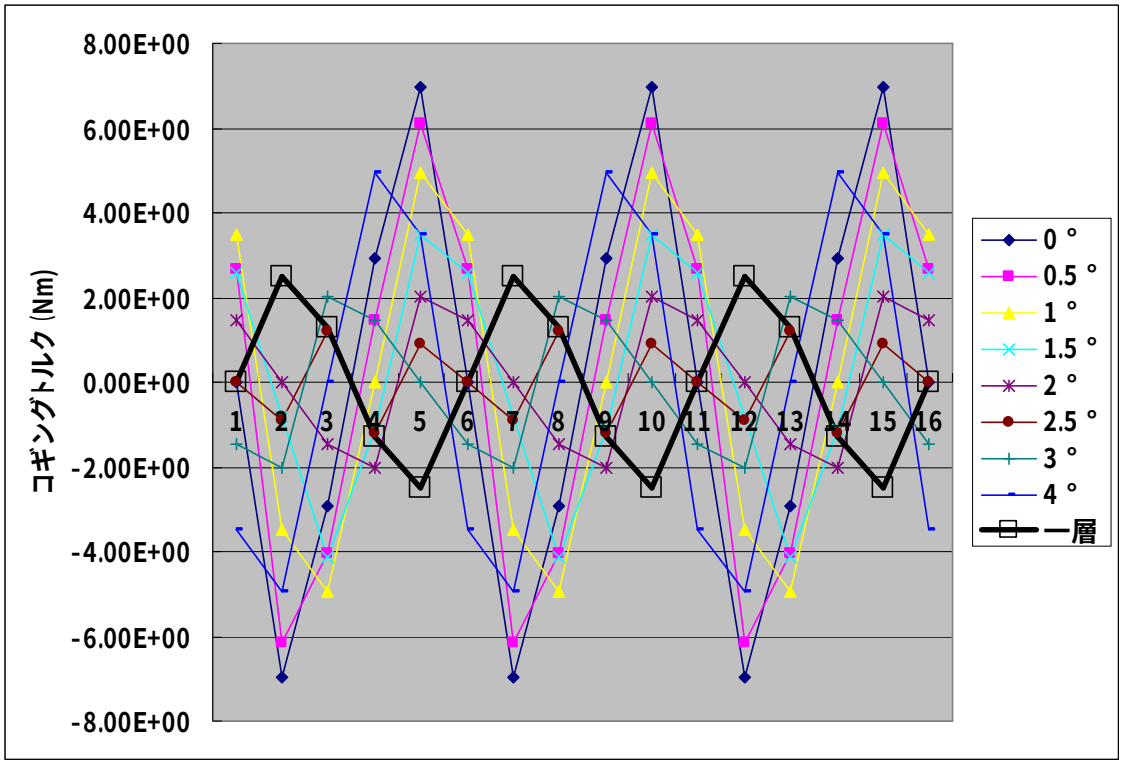


図 5-3　コギングトルクの合計

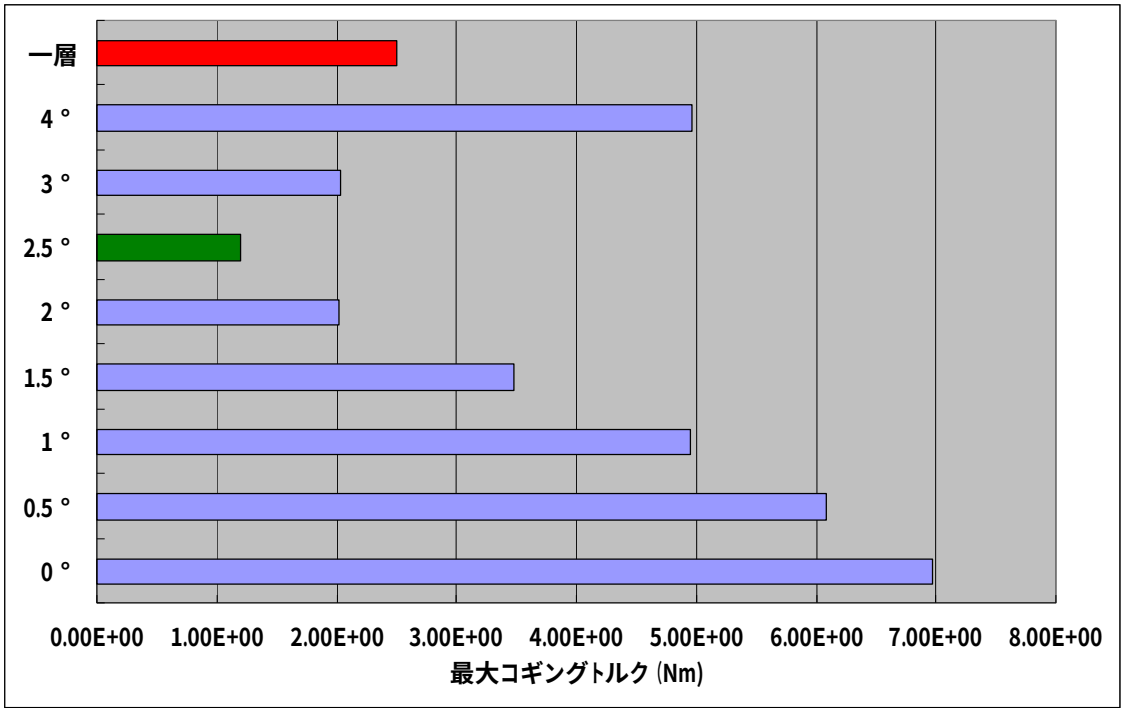


図 5-4　最大コギングトルクの比較

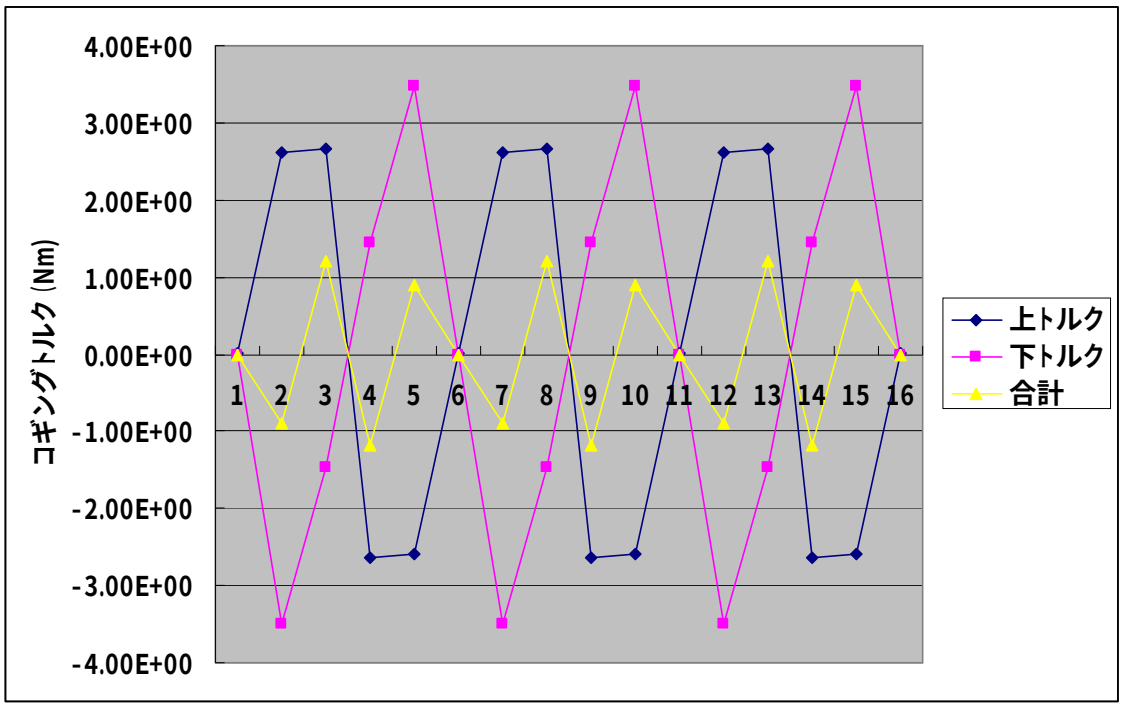


図 5-5　２．５°のときのコギングトルク

図 5-4 から見ても分かるように 2 °～3 °のずれの間でコギングトルクが 1 層の場合よりも小さくなることが分かる。図 5-5 は 2.5 °ずれたときのコギングトルクの図であるが上のトルクと下のトルクが丁度対称になることが分かる。つまり、この発電機の場合一方の U

相、Ｖ相、Ｗ相のコイルともう一方のＵ相、Ｖ相、Ｗ相のコイルを軸方向に２．５°ずらすことによりコギングトルクをよく打ち消すことができ発電機の効率を大いに上げることができる。コギングトルクの周期がコイルの中心１０°ではなく２．５°ずつの周期になったのは磁石が４個あるため２．５°のとき丁度、一方のコイルの磁石配置ともう一方のコイルの磁石配置が一番と遠くなる為であると考えられる。また、誘起電圧はコイルが２倍になったため図のようにほぼ倍になった。図 5-6 はＵ相の線間電圧の実行値を２層２．５°ずれた発電機と１層の発電機の場合と比較したものである。

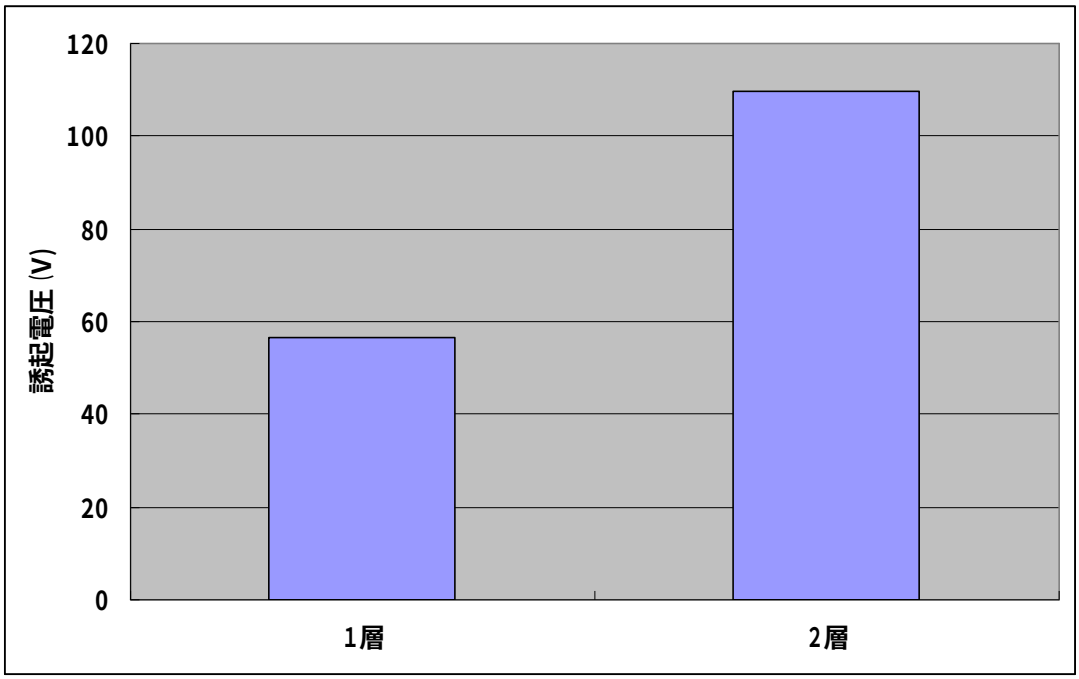
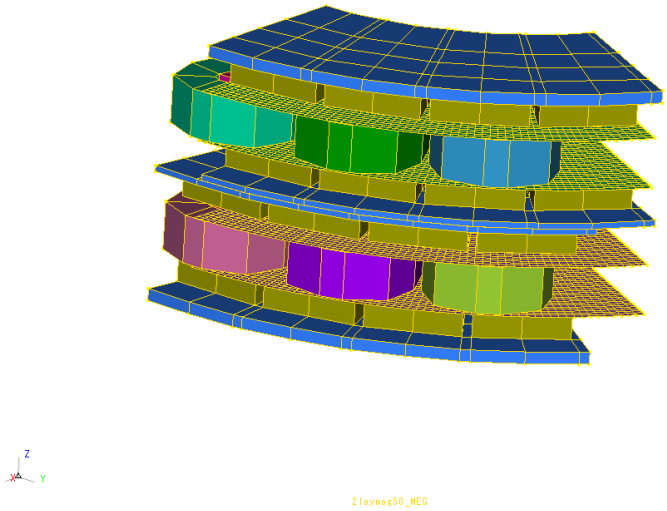


図 5-6　線間電圧の実行値

5-2　磁石をずらした場合の発電効率への影響

先ほどのコイルと磁石の関係が正しいと仮定するならば磁石をずらした場合でも同じ結果が得られるのではないかと考える。そこで次に磁石の半分の角度である７．５°磁石をずらした場合の解析を行った。図 5-7 は解析モデルとその条件である。



・対象モデル

- φ250mm２層発電機
- 磁極厚さ　8mm
- ヨーク厚さ　3mm
- 磁極間距離　2.31mm
- 巻数 66 巻
- コアの厚さ　12mm
- 磁極コイル間の距離　0.5mm
- 上下磁石の差　7.5°

・解析条件

- 回転数 300rpm
- 半径方向 1/6 モデル

図 5-7 解析モデル

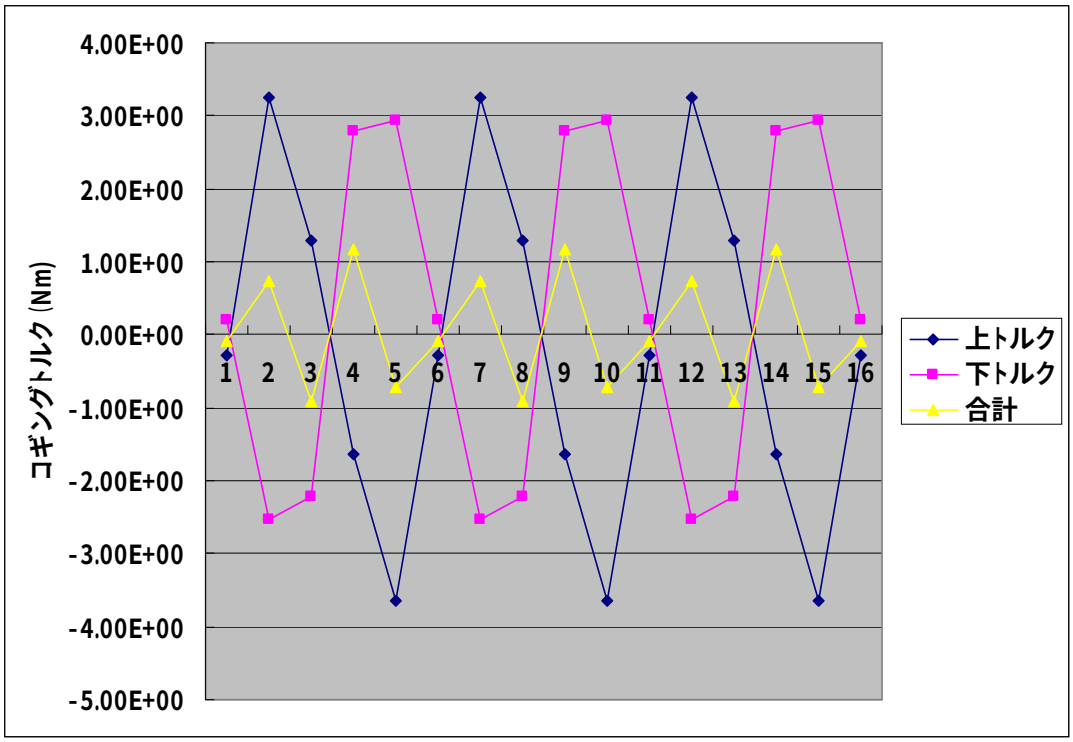


図 5-8　コギングトルクの推移

表 5-1　コイルのずれた場合との比較

	コイルずれ	磁石ずれ
MAX コギングトルク (Nm)	1.20	1.16
MIN コギングトルク (Nm)	-1.19	-0.91
誘起電圧 (V)	109.52	110.27

解析の結果、コギングトルクは上記の図 5-8 のようになった。この値は表 5-1 から見ても分かるように先ほどのコイルを 2.5°ずらした場合と多少の誤差はあるがほぼ一致する。

考察

以上の結果より従来の発電機を２層にしかつ、上下のコイルを軸方向に２．５°ずらすまたは上下のコイルを挟む磁石のいずれかを軸方向に７．５°ずらすことによって従来のコア入りの発電機に比べコギングトルクは半減させることができ、発電量を倍増させることができる。

また、コギングトルクは発電機の大きさが大きくなればなるほど強くなるため発電機が大きくなればなるほど今回の２層構造はさらに有効となる。

第 6 章　結言

今回、環境に配慮した小型水力発電機の設計開発を行うことで以下のような結果を得ることが出来た。

1)　有効落差が 1m前後の落差の少ない農業用水路に適した小型水車として開放主流型水車の設計、製作を行った。

2)　水車の浸水実験を行い流速 1m/s 前後の低流速、農業用水路でも十分な回転とトルクを得ることができ、農業用水路の環境への影響もほぼないことが確認された。

3)　開放周流型水車に取り付けることを目的とした小型水力発電に適した発電機を小型風力発電ようのアキシャルギャップ型コアレス発電機を基に動磁場解析を使い設計開発を行った。

4)　コアの厚みによるコギングトルクへの影響を動磁場解析によって求めた。これにより、コアをコイルの中心付近にコイルに対しての厚さ 60%程度まではコギングトルクをほぼ発生させずに発電量をコアレスの１．５倍程度あげることが出来るという結果が導けた。その為、コアに対する厚み 60%と 80%発電機を実際に製作しモータによる回転実験を行った。この結果、発電機の発電量は動磁場解析の結果とほぼ一致し動磁場解析の有効性が証明された。また、コアレスとの発電効率の比較をしたところ厚み 60%と 80%発電機はコアレス発電機より発電効率が 10%程度上昇することが確認された。

5)　コアの厚みがコギングトルクに与える影響の原因を調べる為、動磁場解析により磁束密度の可視化を行った。これによりコギングトルクの発生はコアと磁極の距離が関係する。よって、本研究の効率の良い発電機を作るためにはコイルと磁石の距離を出来るだけ近づけること、コイルの中のコアを 60%程度とることによってコギングトルクを発生させずに発電量を大きくすることが出来ると考えられる。ただし、この値はコイル磁石間の距離、磁石の性能等により変化する為、動磁場解析などにより最適値を導く必要がある。

6)　コギングトルクを減らす発電機として２層型コア入り発電機の動磁場解析を行った。この結果、上下のコイルを軸方向に２．５°ずらすまたは上下のコイルを挟む磁石のいずれかを軸方向に７．５°ずらすことによって従来のコア入りの発電機に比べ

コギングトルクは半減させることができ、発電量を倍増させることができる。また、コギングトルクは発電機の大きさが大きくなればなるほど強くなるため発電機が大きくなればなるほど今回の２層構造はさらに有効となる。

以上、様々な実験、解析を行い小型水力発電の研究開発を行ってきた。今後より、効率の良い水車、発電機の開発を進めたい。

謝辞

本研究にご協力くださった皆さん特に、㈱エルフの朝井様、薮内様、柴崎様、㈱スカイ電子の廣林社長、中内部長、村山自転車様、電子光システム工学科の八田教授とゼミの皆様、土佐山田町商工会議所の皆様、舟入小学校の先生方、長野様、さらにこれまでご指導頂いた坂本東男教授に心より厚くお礼申し上げます。

参考文献

http://www.osaka-jma.go.jp/takamatsu/takama01.html 「高松気象台ホームページ」
千矢博道著 「これからやりたい人の小型水力発電入門」パワー社
ELF/MAGIC 取扱説明書
尾崎 聖宏 （2006）「アキシャル型風力発電機の最適設計と動磁場解析」
中田高義 高橋則雄 共著 「電気工学の有限要素法」森北出版株式会社
日立製作所総合教育センタ技術研修所編「わかりやすい小形モータの技術」オーム社
http://www.enecho.meti.go.jp/index.htm 「資源エネルギー庁ホームページ」
http://www.elf.co.jp/product/top.html 「株式会社エルフホームページ」